

CARTE HYDROGÉOLOGIQUE DE WALLONIE

Echelle : 1/25 000



Photos couverture © SPW-DGARNE(DGO 3)

Fontaine de l'ours à Andenne

Forage exploité

Argillère de Celles à Houyet

Puits et sonde de mesure de niveau piézométrique

Emergence (source)

Essai de traçage au Chantoir de Rostenne à Dinant

Galerie de Hesbaye

Extrait de la carte hydrogéologique de Modave – Clavier



MODAVE – CLAVIER

48/7-8

Ingrid **RUTHY**, Vincent **HALLET**, Valérie **PETERS**, Radu Constantin **GOGU**,
Alain **DASSARGUES**, Alberic **MONJOIE**

Université de Liège
Sart-Tilman - Bâtiment B52 B-4000 Liège (Belgique)



NOTICE EXPLICATIVE

2016

Première édition : Mars 2000
Actualisation partielle : Janvier 2016

Dépôt légal – **D/2016/12.796/4** - ISBN : **978-2-8056-0218-4**

SERVICE PUBLIC DE WALLONIE

**DIRECTION GENERALE OPERATIONNELLE DE L'AGRICULTURE,
DES RESSOURCES NATURELLES
ET DE L'ENVIRONNEMENT
(D GARNE-DGO 3)**

AVENUE PRINCE DE LIEGE, 15
B-5100 NAMUR (JAMBES) - BELGIQUE

Table des matières

Avant-propos	3
I. Introduction	5
II. Cadres géographique, géomorphologique, hydrographique et pédologique	6
III. Cadre géologique	11
III.1. Cadre géologique régional	11
III.2. Cadre géologique de la carte	12
III.2.1. Cadre litho-stratigraphique.....	13
III.2.1.1. Formations du Paléozoïque	13
III.2.1.2. Formations du Cénozoïque.....	15
III.2.1.3. Comparaison entre l'ancienne et la nouvelle nomenclature géologique.....	16
III.2.2. Cadre structural	17
IV. Cadre hydrogéologique	20
IV.1. Description des unités hydrogéologiques	22
IV.1.1. Unités hydrogéologiques du Dévonien.....	22
IV.1.1.1. Aquitard du Famennien.....	22
IV.1.1.2. Aquifère des grès du Famennien.....	22
IV.1.2. Unités hydrogéologiques du Carbonifère	23
IV.1.2.1. Aquifère – Aquitard – Aquiclude de l'Hastarien	23
IV.1.2.2. Aquifère des calcaires du Carbonifère	24
IV.1.2.3. Aquiclude à niveaux aquifères du Houiller.....	24
IV.1.3. Unités hydrogéologiques du Cénozoïque	25
IV.1.3.1. Aquifère des sables de remplissage	25
IV.1.3.2. Aquitard limoneux (non cartographié).....	25
IV.1.3.3. Aquifère alluvial.....	25
IV.2. Description de l'hydrogéologie de la carte	27
IV.2.1. Synclinal faillé de Marchin	28
IV.2.2. Synclinal faillé de Vyle-et-Tharoul	30
IV.2.3. Entité de Modave	34
IV.2.4. Entité de Clavier	42
IV.2.5. La transition Condroz-Famenne.....	49
IV.2.6. Relation entre les eaux souterraines et les eaux de surface & Modélisation hydrogéologique régionale (Projet Synclin'Eau)	50
IV.2.7. Phénomènes karstiques.....	53
IV.2.8. Coupes hydrogéologiques	54
IV.2.9. Caractère des nappes	56
IV.2.10. Piézométrie de la carte Modave-Clavier.....	56
V. Cadre hydrochimique	58
V.1. Caractéristiques hydrochimiques des eaux	60
V.1.1. Aquifère des calcaires du Carbonifère	62
V.1.2. Aquifère des grès du Famennien	64
V.1.3. Aquiclude à niveaux aquifères du Houiller	65
V.2. Problématique des nitrates	66
V.3. Qualité bactériologique	70
V.4. Pesticides	70
VI. Exploitation des aquifères	73
VII. Paramètres d'écoulement et de transport	78

VIII. Zones de protection.....	86
VIII.1. Cadre légal	86
VIII.2. Zones de prévention des captages de l'AIEC	88
VIII.3. Zones de prévention des captages la CIESAC.....	90
VIII.4. Zones de prévention des captages la CILE	93
VIII.5. Zones de prévention des captages de VIVAQUA	95
VIII.6. Zones de prévention du captage de la SWDE	97
IX. Méthodologie d'élaboration de la carte hydrogéologique.....	98
IX.1. Origine des informations.....	98
IX.1.1. Données géologiques et connexes.....	98
IX.1.2. Données météorologiques et hydrologiques.....	99
IX.1.3. Données hydrogéologiques	100
IX.1.3.1. Localisation des ouvrages.....	100
IX.1.3.2. Données piézométriques.....	100
IX.1.3.3. Données hydrochimiques et tests sur les puits	101
IX.1.4. Autres données	101
IX.2. Base de données hydrogéologiques.....	102
IX.3. Poster de la carte hydrogéologique	102
IX.3.1. Carte hydrogéologique principale.....	103
IX.3.2. Carte des informations complémentaires et du caractère des nappes	103
IX.3.3. Carte des volumes d'eau prélevés	104
IX.3.4. Tableau de correspondance 'Géologie-Hydrogéologie'	104
IX.3.5. Coupes hydrogéologiques.....	104
X. Bibliographie.....	105
Annexe 1: Liste des abréviations des institutions et organismes	111
Annexe 2: Table des illustrations	113
Annexe 3: Carte de localisation.....	116
Annexe 4: Coordonnées géographiques des ouvrages cités dans la notice	117

AVANT-PROPOS

La réalisation de la carte hydrogéologique Modave-Clavier s'inscrit dans le cadre du programme de cartographie des ressources en eau souterraine de Wallonie, commandé et financé par le Service Public de Wallonie (SPW), Direction Générale opérationnelle de l'Agriculture, des Ressources naturelles et de l'Environnement (D GARNE-DGO3). Cette carte hydrogéologique a été réalisée par l'unité 'Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement' du secteur GEO³ du département ArGEnCo de l'Université de Liège. La première version de cette carte date de 2000¹ (carte prototype) et a été réalisée par V.Hallet, V.Péters, R.C.Gogu et I.Ruthy, sous la direction du Prof. A.Monjoie. L'actualisation de cette carte a été effectuée en 2015 par Ingrid Ruthy et a été supervisée par le Prof.Alain Dassargues. Elle prend en compte les données disponibles dans la base de données "BD-Hydro" (outil de travail commun aux équipes universitaires et à l'administration wallonne, D GARNE). Ainsi les données concernées sont les zones de prévention, les volumes prélevés, les nouveaux ouvrages déclarés, des données piézométriques nouvelles encodées dans la base de données. Une collecte exhaustive de données complémentaires n'a pas été menée.

Collaborent au projet 'Carte hydrogéologique de Wallonie' l'Université de Mons (UMons), l'Université de Namur (UNamur) et l'Université de Liège (ULg) dont le site ULg-Arlon.

Les auteurs de la carte hydrogéologique remercient tous les bureaux d'études actifs dans le domaine de l'environnement qui ont fourni de nombreuses données, et plus particulièrement le Bureau Conseil en Géologie (BCG), GEOLYS et ECOFOX. Nous remercions également l'AIEC, la CIESAC, la CILE, la SWDE et VIVAQUA. Nous remercions aussi tous les particuliers et industries (carrières) qui nous ont permis de visiter leur prise d'eau et d'y faire quelques mesures, lors de la première édition de la carte hydrogéologique. Merci aussi à Jean-Marc Marion, géologue-cartographe à l'Université de Liège (Département de Géologie) pour ses indications précieuses sur la lithologie et le cadre structural de la région. Pour sa relecture attentive et constructive de la carte et de la notice, nous remercions Vincent Hallet, professeur à l'Université de Namur (Département de Géologie). Merci également à Sylvie Roland (UMons, cellule d'Hydrogéologie).

La carte hydrogéologique est basée sur un maximum de données géologiques, hydrogéologiques et hydrochimiques disponibles auprès de divers organismes. Elle a pour objectif d'informer de l'extension, de la géométrie et des caractéristiques hydrogéologiques, hydrodynamiques et hydrochimiques des aquifères, toutes personnes, sociétés ou institutions concernées par la gestion tant quantitative que qualitative des ressources en eaux.

Par un choix délibéré, toute superposition outrancière d'informations conduisant à réduire la lisibilité de la carte a été évitée. Dans ce but, outre la carte principale, deux cartes thématiques et deux coupes, géologique et hydrogéologique, ainsi qu'un tableau litho-stratigraphique sont présentés.

¹ Hallet V., Péters V., Ruthy I., Gogu R.C. & Monjoie A. (2000). Carte hydrogéologique de Wallonie (prototype), Modave-Clavier, 48/7-8. 1:25000. Namur, Service Public de Wallonie, Direction générale opérationnelle Agriculture, Ressources naturelles et Environnement, 1 notice explicative de 43 p. + annexes

Les données utilisées pour la réalisation de la carte ont été encodées dans une base de données (GDB-ArcGIS-Esri) qui a été remise à la Direction des Eaux Souterraines (SPW, DGO3 DGARNE).

Depuis mai 2006, la carte hydrogéologique de Wallonie est consultable en ligne via le portail cartographique du Service public de Wallonie. Cette application WebGIS est disponible à l'adresse <http://environnement.wallonie.be/cartosig/cartehydrogeo>.

I. INTRODUCTION

La région de Modave-Clavier se positionne, à mi-chemin, entre Namur à l'ouest et Liège au nord-est (Figure I.1). L'aquifère principal est logé au sein des calcaires du Carbonifère de la partie centrale du Synclinorium de Dinant. Cette ressource en eau, de première importance, est exploitée par plusieurs compagnies d'eau. Cette eau souterraine alimente non seulement les communes avoisinantes mais également les villes de Bruxelles et de Liège.



Figure I.1: Localisation de la carte Modave-Clavier

II. CADRES GEOGRAPHIQUE, GEOMORPHOLOGIQUE, HYDROGRAPHIQUE ET PEDOLOGIQUE

La région de Modave-Clavier fait entièrement partie du Condroz. L'ensemble paysager² qu'est le Plateau condrusien, couvre 15 % du territoire wallon. Il est situé entre les vallées de la Sambre et de la Meuse au nord, de l'Eau d'Heure à l'ouest, la dépression de la Fagne-Famenne au sud et l'Ardenne à l'est. Ce plateau, légèrement incliné vers le nord, est coupé en deux par la Haute-Meuse. Les grands traits du relief condrusien sont directement liés à la géologie (roches de résistances différentes face à l'érosion). Cela se caractérise par une alternance de crêtes topographiques sur les grès ("tiges") et de dépressions dans les calcaires ("chavées"), orientées nord-est / sud-ouest, selon la direction des couches géologiques. Trois territoires paysages couvrent la carte Modave-Clavier (Figure II.1). Le Moyen plateau du vrai Condroz en occupe la plus grande surface. La vallée du Hoyoux entaille le plateau perpendiculairement à la structure générale des tiges et des chavées. Ses versants peuvent être abrupts. Dans le sud-est, apparaît le faciès de la bordure fameno-condrusienne, zone de transition vers la Fagne-Famenne au relief accidenté et aux versants boisés (Castiau et *al*, 2010).

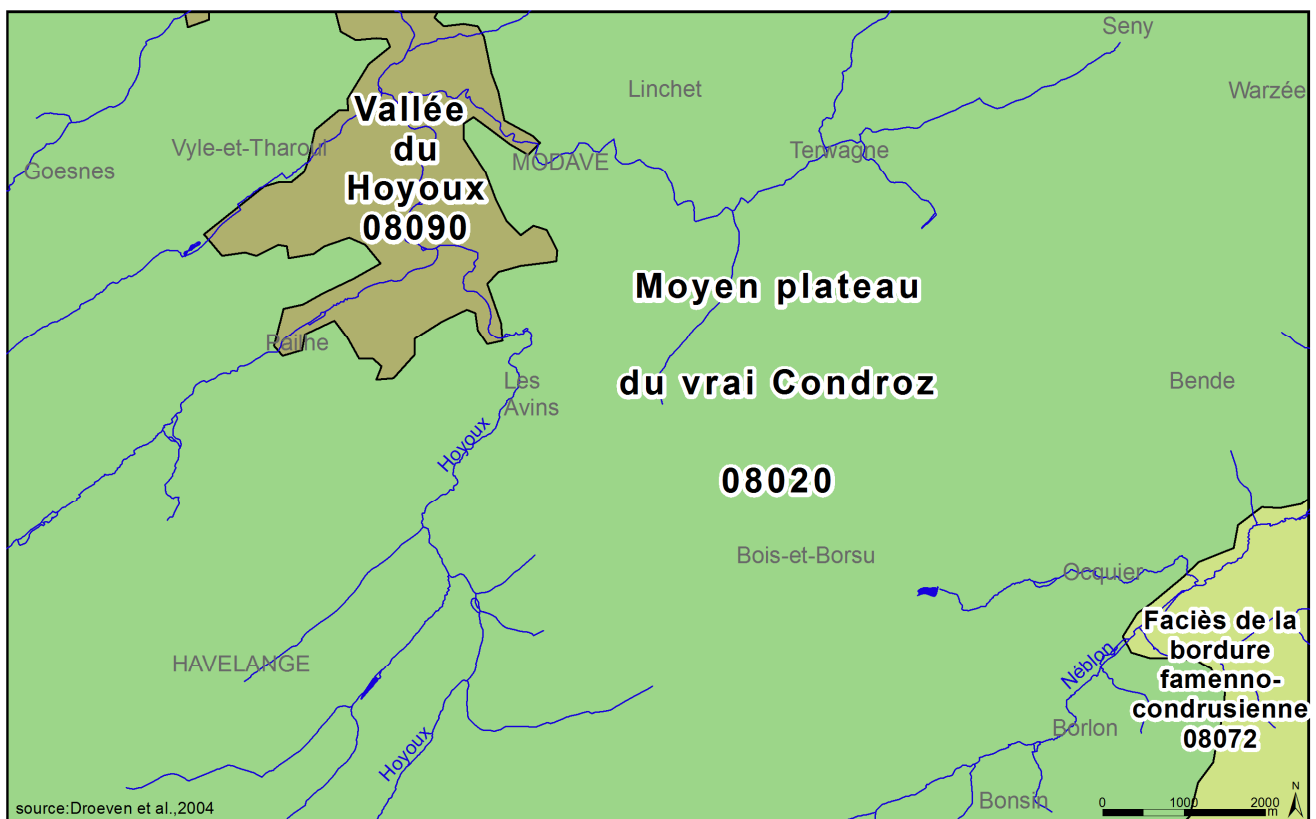


Figure II.1: Territoires paysagers – Modave-Clavier

² 76 territoires paysagers regroupés en 13 ensembles sont distingués en Wallonie. Une carte de ces territoires paysagers, accompagnée d'une notice explicative, est disponible auprès du SPW. Les références complètes de cette publication sont données au chapitre X

La carte Modave-Clavier est caractérisée par un relief ondulé de manière régulière. Cette région appartient entièrement au bassin hydrographique de la Meuse. Deux bassins-versants majeurs se partagent la carte (Figure II.2):

- le bassin du Hoyoux couvre 70 % de la carte (112 km²). Ses eaux s'écoulent vers le nord et rejoignent la Meuse à Huy. Quatre sous-bassins sont identifiés:
 - en rive droite, le bassin du Torrent de Bonne;
 - en rive gauche, du sud au nord, le bassin de Pailhe, le bassin de Vyle et le bassin du Triffoy.
- le bassin de l'Ourthe draine 30 % de la carte (48 km²), ses eaux se dirigent vers l'est avec :
 - le bassin du Néblon s'étend sur 45 km²;
 - le bassin d'Anthistes situé au nord-est.

Si le réseau hydrographique est orienté, majoritairement nord-est / sud-ouest, selon la structure géologique générale, ce n'est pas le cas du Hoyoux qui traverse perpendiculairement la structure plissée, indifférent à la nature des roches. Les autres cours d'eau, plus récents, s'écoulent généralement dans les chavées calcaires. La structure géologique se lit aisément dans l'allure du relief (orientations semblables). Ainsi la crête topographique ou tige passant par Bois-et-Borsu, Clavier et Warzée marque la limite entre les deux bassins hydrographiques principaux de la carte (Figure II.2).

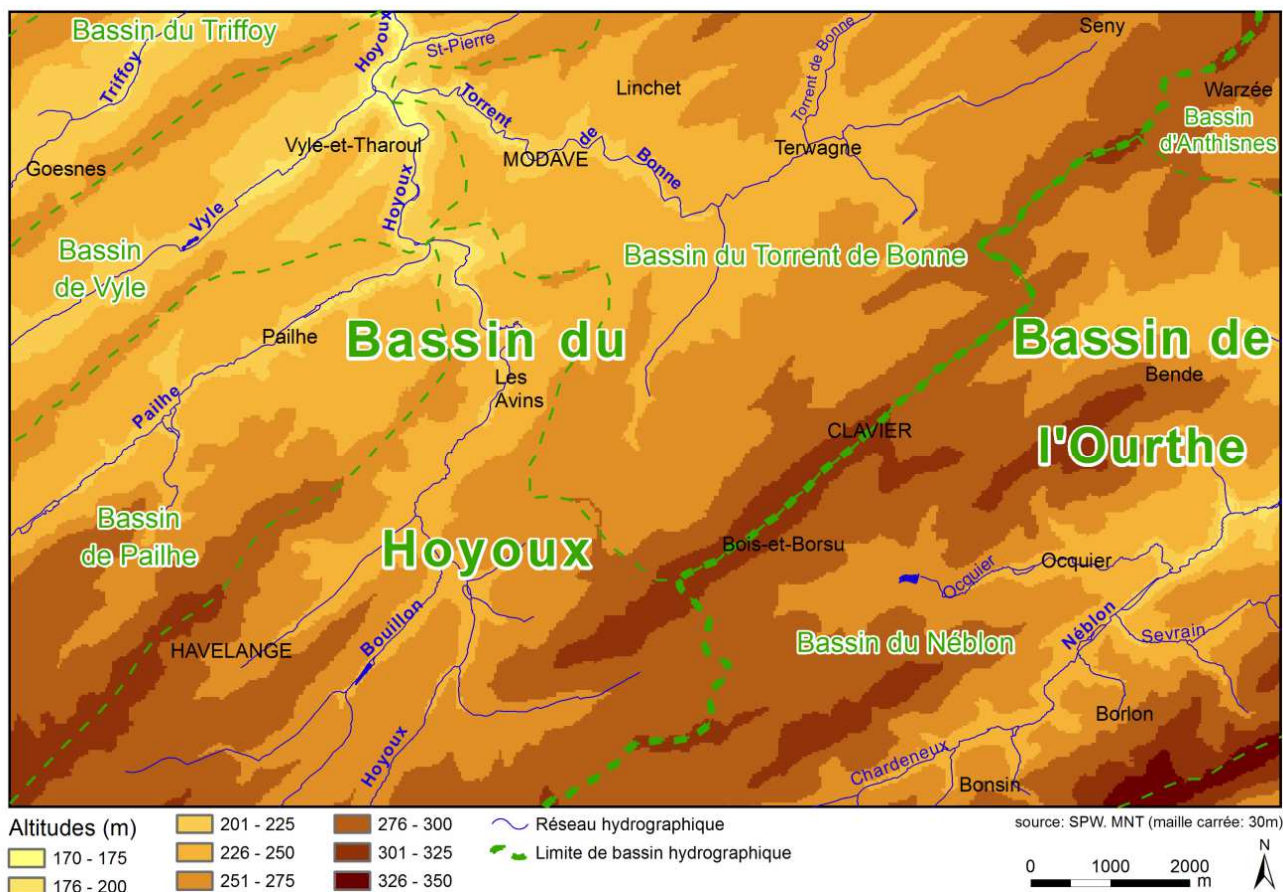


Figure II.2: Relief, bassins-versants, rivières – Modave-Clavier

La nature du sous-sol et du sol influencent le relief et les paysages ainsi que l'affectation du sol. La carte des types de sols (Figure II.3) reflète bien la complexité de la géologie de la région de Modave-Clavier. Les grandes structures géomorphologiques s'y lisent aisément. La succession des tiges et des chavées ressort nettement sur la carte pédologique. Cette carte indique une prépondérance des sols autochtones limono-caillouteux. Les données sont extraites de la Carte Numérique des Sols de Wallonie³ (CNSW, 2007). La nature de la charge caillouteuse des sols est directement liée à la roche-mère. Les sols à charge schisteuse, psammitique ou schisto-psammitique sont situés au droit des crêtes gréseuses du Condroz et de la zone de transition vers la dépression de la Famenne. Ainsi, les tiges, dont les sols sont plutôt sableux, sont généralement couvertes par des boisements, comme cela s'observe sur la crête entre les ruisseaux de Pailhe et de Vyle (Figures II.3 & II.4). Les sols à charge calcaire se retrouvent davantage au droit des formations carbonatées. Ainsi, les chavées ou dépressions calcaires, ainsi que les versants en pente douce, sont occupés par les labours et les prairies. D'une manière générale, sur l'ensemble de la carte, le drainage naturel est favorable.

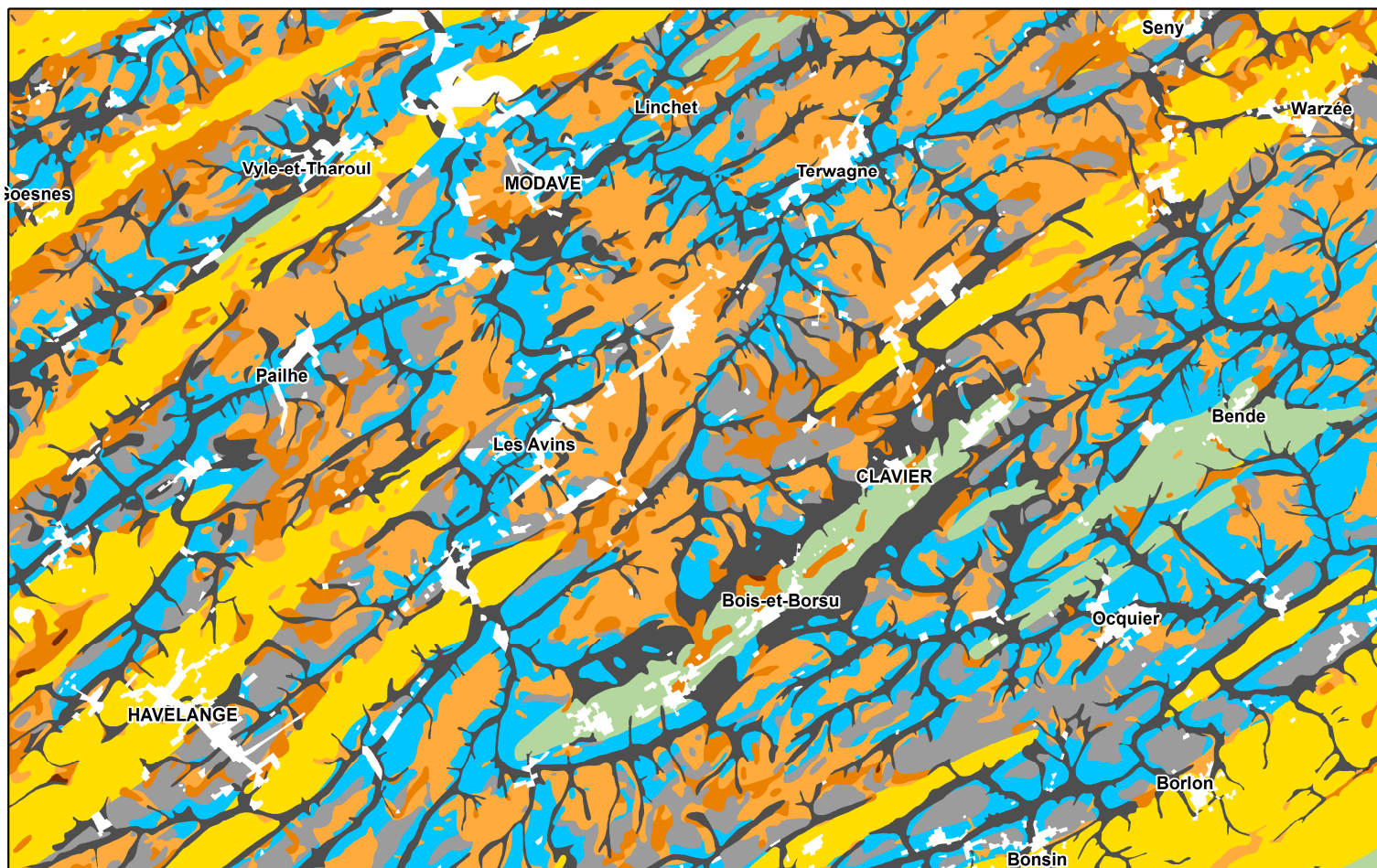
La figure II.4 représente la carte d'occupation du sol de la région de Modave-Clavier (répartition selon les 6 classes du niveau 1). Ces données sont extraites de la carte numérique de l'occupation du sol wallon⁴. Les espaces agricoles occupent presque les trois-quarts de la superficie de la carte et les forêts environ un cinquième (tableau II.1). Les territoires agricoles sont composés pour moitié de terres arables (labours) et pour moitié de surfaces enherbées (prairies). L'habitat est groupé en villages et hameaux. Il s'étire aussi le long des tiges et des axes de communication (suite à l'urbanisation croissante). La catégorie "Territoires artificialisés" ne comprend pas exclusivement les zones d'habitat. Ainsi, les carrières situées au nord de la carte dans la vallée du Hoyoux sont incluses dans ce groupe. La route nationale N63, appelée aussi la "Route du Condroz" reliant Liège à Marche-en-Famenne, traverse la carte du nord au sud via Terwagne et Bois-et-Borsu (trait rouge coupant la figure II.4).

Tableau II.1: Répartition de l'occupation du sol – Modave-Clavier

Territoires artificialisés (dont les zones d'activité extractive)	13,3 km ²	8,3%
Territoires agricoles	112 km ²	70%
Forêts et milieux semi-naturels	34,1 km ²	21,3%
Surface en eau	0,64 km ²	0,4%

³ Pour plus d'informations, consulter <http://cartopro3.valid.wallonie.be/CIGALE/>

⁴ La Carte de l'Occupation du Sol en Wallonie (COSW) est dressée au 1/10 000. Elle est basée sur les données cartographiques vectorielles à la Région wallonne. La couche de base est le PLI (Plan de Localisation Informatique – 1/10.000). On peut considérer en effet qu'il couvre l'ensemble du territoire régional, même si une partie de ce dernier n'est pas « cadastrée » (5 % du territoire wallon). La légende de la COSW est hiérarchisée en 5 niveaux de détails. Le niveau 1, le plus global, comporte 6 classes d'occupation du sol et le niveau 5, le plus détaillé, en contient 97. Pour plus d'informations: <http://geoportail.wallonie.be>



Sources des données : Copyright • SPW- 150210-0905

Type de sol

- Sols limoneux à drainage naturel favorable
- Sols limoneux à drainage naturel modéré ou imparfait
- Sols limoneux à drainage naturel assez pauvre à très pauvre
- Sols limoneux peu caillouteux à drainage naturel favorable
- Sols limono-caillouteux à charge schisteuse et à drainage naturel principalement favorable
- Sols limono-caillouteux à charge psammitique ou schisto-psammitique et à drainage naturel principalement favorable
- Sols limono-caillouteux à charge calcaire ou contenant du calcaire et à drainage naturel quasi-exclusivement favorable
- Sols limono-caillouteux à charge de silexite ou de gravier ou de conglomérat et à drainage naturel principalement favorable
- Regroupement de complexes de sols de textures différentes ou sur fortes pentes et de sols de fonds de vallons limoneux ou rocailleux
- Sols artificiels ou non cartographiés



Figure II.3: Carte des types de sol – Modave-Clavier

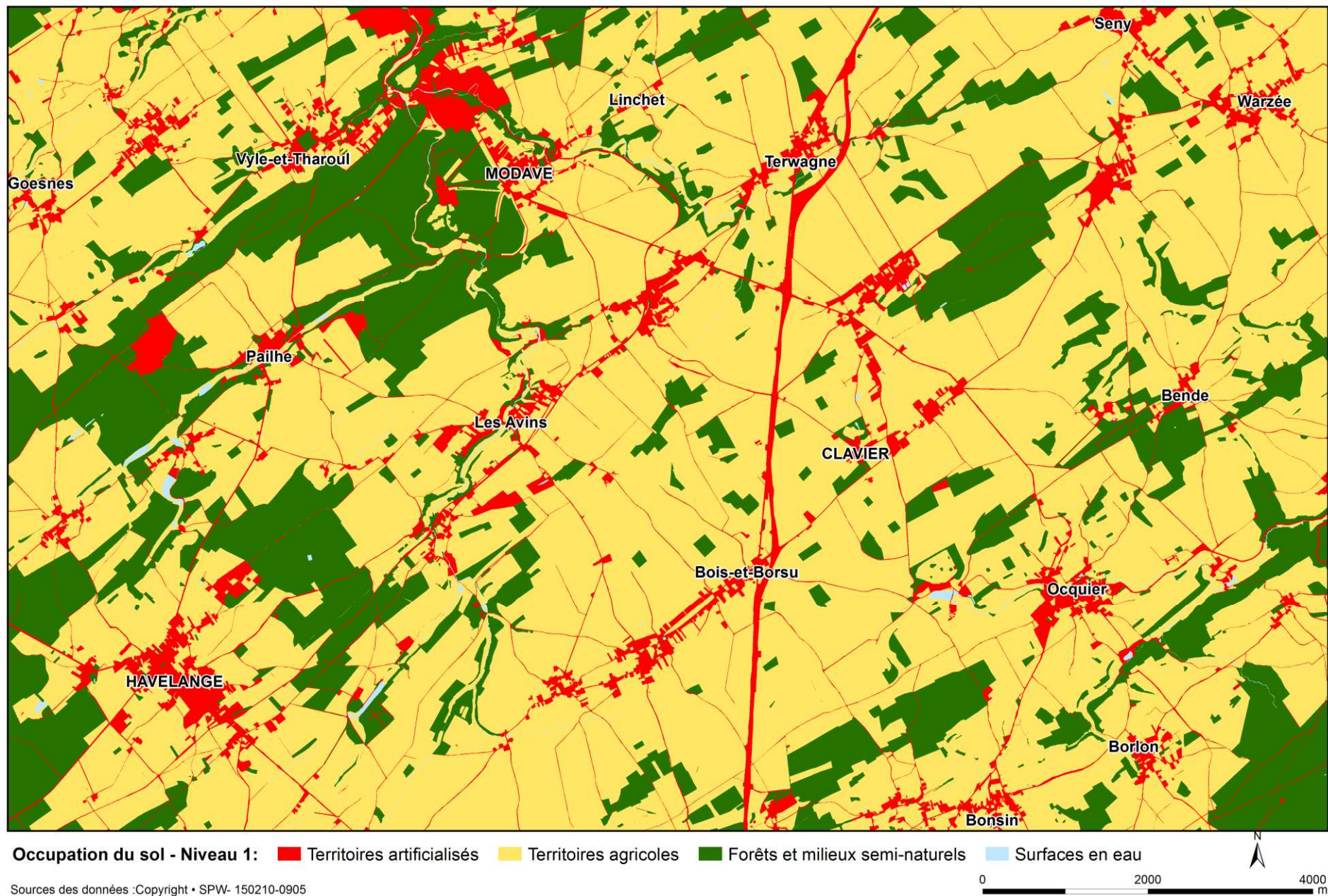


Figure II.4: Carte de l'occupation du sol – Modave-Clavier

III. CADRE GEOLOGIQUE

III.1. CADRE GEOLOGIQUE REGIONAL

La carte Modave-Clavier se situe dans le Synclinorium de Dinant (Figure III.1). Cette mégastructure géologique est composée de formations sédimentaires dévono-carbonifères. Elle comprend deux zones synclinales séparées par un axe anticlinal de Philippeville à Durbuy. Dans le Condroz, le Synclinorium de Dinant est caractérisé par une succession d'anticlinaux gréseux à cœur famennien et de synclinaux calcaires carbonifères. Ces formations dévono-carbonifères ont été plissées et faillées lors de l'orogénèse varisque à la fin du Westphalien. Lors de cette phase orogénique, le Synclinorium de Dinant a été charrié vers le nord sur le Parautochtone brabançon par le jeu de la Faille du Midi. Le Synclinorium de Dinant est limité au sud par l'Anticlinorium de l'Ardenne (Boulvain & Pingot, 2011).

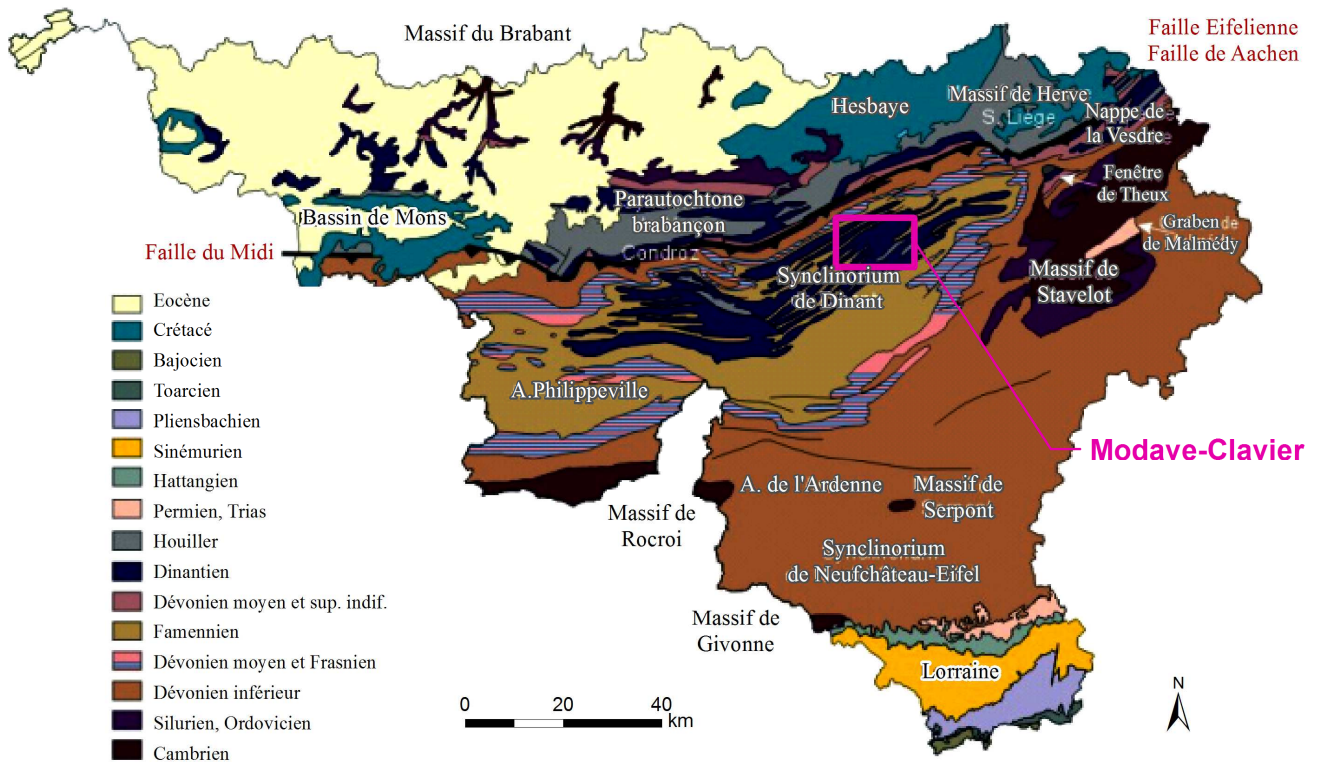


Figure III.1: Carte géologique de la Wallonie (Boulvain & Pingot, 2011; modifié)

III.2. CADRE GEOLOGIQUE DE LA CARTE

Les formations géologiques rencontrées à l'affleurement sur la carte Modave-Clavier sont constituées de roches datant du Famennien au Namurien. Elles appartiennent au Synclinorium de Dinant. Après avoir subi l'orogénèse varisque, elles ont été érodées et pénéplanées. Des sédiments meubles, argilo-sableux, d'âge paléogène-néogène ont été piégés dans les paléokarsts. Les dépôts quaternaires sont aussi présents sous forme de dépôts limoneux, de produits d'altération, d'éboulis de pentes, de colluvions ou d'alluvions modernes dans les vallées.

A l'heure de la finalisation de l'actualisation de la carte hydrogéologique Modave-Clavier, la nouvelle carte géologique n'est pas encore éditée. Les tracés sont réalisés mais ils ne sont pas encore validés par les comités de pilotage et de lecture de la carte géologique de Wallonie. Ainsi, la description lithologique des formations fait référence à la carte n°157 de Lohest M., Forir H. et Murlon M., dressée en 1902. Cette carte sert de fond à la carte hydrogéologique, utilisant ainsi les anciennes dénominations.

Rappelons que depuis le début du XX^{ième} siècle, l'échelle stratigraphique et le découpage des unités lithologiques ont changé. La terminologie utilisée actuellement ne correspond donc plus nécessairement à celle utilisée en 1902. A l'époque, la subdivision en assises correspondait à un découpage basé sur la biostratigraphie et la chronostratigraphie alors qu'aujourd'hui, les nouvelles cartes géologiques se basent sur la lithostratigraphie. Plus d'informations sur la nouvelle échelle stratigraphique de Belgique peuvent être trouvées dans Bultynck & Dejonghe (2001).

En fin de ce sous-chapitre, dans un tableau récapitulatif, les anciennes appellations (assises) de la carte de Lohest et *al.* (1902) sont mises en parallèle avec les noms des formations définies dans la nouvelle nomenclature de l'échelle lithostratigraphique de Belgique (Bultynck & Dejonghe, 2001; comm. orale J-M Marion, 2015).

En outre, certains termes, anciens et locaux, ne sont plus très usités dans la terminologie actuelle (Dejonghe, 2007):

- *Macigno*: grès à ciment argilo-calcaire.
- *Psammite*: mot utilisé jadis en Belgique pour désigner des grès micacés largement employés en construction. La forte proportion de paillettes de micas, disposés en lits parallèles, leur confère une aptitude à se débiter en feuillets.
- *Schiste*: roche argileuse de la classe des lutites⁵, consolidée, ayant pris une schistosité. Notons que le mot schiste a souvent été employé en français dans le sens de shale.

⁵ Lutites: ensemble des roches sédimentaires détritiques dont les éléments sont de diamètre inférieur à 1/16 mm (62,5 µm)

III.2.1. Cadre litho-stratigraphique

III.2.1.1. Formations du Paléozoïque

III.2.1.1.1 Dévonien

L'échelle litho-stratigraphique de la région de Modave-Clavier démarre avec le Dévonien supérieur et plus précisément les formations détritiques terrigènes du Famennien.

Famennien

Le Famennien inférieur (Fa1) affleure en bordure des anticlinaux faillés dans le nord-ouest de la carte ainsi qu'au cœur de l'anticlinal de Borlon (sud-est de la carte). Il est représenté par deux assises, non distinguées cartographiquement:

- Assise de Mariembourg (Fa1b): schistes souvent violacés avec grès micacés. Son épaisseur est estimée à plus de 100 m.
- Assise d'Esneux (Fa1c): grès micacés stratoïdes et schistoïdes à nombreux spirifères et tiges minces d'encrinites. Son épaisseur est approximativement de 150 m.

Le Famennien supérieur (Fa2) compte quatre assises, de la plus ancienne à la plus jeune:

- Assise de Souverain-Pré (Fa2a): grès à ciment argilo-calcaire ou schistes noduleux avec grès micacés et schistes vers le haut. Epaisseur estimée à 100 m.
- Assise de Monfort (Fa2b): grès micacés stratoïdes en bas de l'assise, massifs en haut. Epaisseur: environ 150 m.
- Assise d'Evieux (Fa2c): grès micacés et schistes avec grès à ciment argilo-calcaire ou schistes noduleux. Epaisseur: environ 150 m.
- Assise de Comblain-au-Pont (Fa2d): alternance de calcaire, schistes, grès micacés et grès à ciment argilo-calcaire. Le sommet de cette assise a été rattaché au Strunien. Epaisseur: environ 45 m.

A l'exception du coin sud-est, où Fa2a est cartographiée séparément, ces quatre assises sont cartographiées ensemble sur la carte Modave-Clavier.

III.2.1.1.2 Carbonifère

La sédimentation du Carbonifère commence par des dépôts carbonatés du Dinantien (Tournaisien-Viséen) et devient terrigène au Silésien (Houiller). Au Tournaisien, un faciès carbonaté marin de type épicontinental s'installe progressivement avec à la base des schistes et des calcaires en alternance, franchement carbonatés ensuite. Au Viséen, le faciès est nettement plus carbonaté avec des passages dolomités. Le Houiller se caractérise par le retour à un faciès schisto-gréseux de type paralique et riche en matières carbonées.

Plusieurs aires de sédimentation du Dinantien sont observées au sein de la plate-forme carbonatée, située au sud du Massif du Brabant. La carte de Modave-Clavier appartient à l'aire de sédimentation du Condroz (ASC)(Hance et al, 2001).

Tournaisien

Le Tournaisien inférieur, défini comme l'Assise d'Hastière sur la carte de 1902 et redéfini en tant qu'Étage Hastarien dans la nouvelle échelle stratigraphique, est constitué de

- T1a: calcaires à crinoïdes avec minces lits schisteux intercalaires. Son épaisseur est estimée à 20 m.
- T1b: shales bruns foncés. Epaisseur approximative: 10 m.
- T1c: calcaires à crinoïdes de Landelies. Epaisseur: environ 40 m.
- T1ch: calcschistes et calcaires noirs argileux. Cette formation, bien que renseignée dans la légende de la carte de Lohest et *al* (1902), n'est pas caractéristique de la vallée du Hoyoux. Sur la carte étudiée, on ne la retrouve qu'au sud-est d'Havelange.

Ces formations ne sont pas distinguées cartographiquement sur l'ancienne carte géologique. Elles sont regroupées sous l'Assise d'Hastière, T1.

Le Tournaisien supérieur, défini comme Assise d'Ecaussines et Waulsort sur l'ancienne carte et redéfini en tant qu'Étage Ivorien, regroupe

- T2a: calcaires d'Yvoir à cherts noirs et crinoïdes sporadiques. Son épaisseur est de l'ordre de 60 m.
- T2b: calcaires à crinoïdes, petit "granit" de l'Ourthe et des Ecaussines. Son épaisseur est approximativement de 30 m.

Viséen

Cet étage est subdivisé en deux assises sur la carte géologique de Lohest et *al*. (1902): Dinant (V1) et Visé (V2). Dans la nouvelle nomenclature, le Viséen est une série, elle-même subdivisée en trois étages: Moliniacien, Livien, Warnantien.

Le Viséen inférieur est composé de

- V1a: calcaires noirs à cherts, souvent dolomités. Son épaisseur est estimée à 50 m.
- V1b: calcaires noirs et bleus à crinoïdes, généralement dolomités. Encrinite à la base. Epaisseur: environ 150 à 200 m.

Le Viséen supérieur est composé de

- V2a: calcaires massifs clairs, souvent oolithiques. Son épaisseur est estimée à 40 m.
- V2b: calcaires foncés séquentiels. Son épaisseur est de l'ordre de 100 m
- V2c: calcaires à stromatolites, calcaires clairs à foncés, souvent algaires, calcaires foncés séquentiels, quelques intercalations argilo-charboneuses. Epaisseur: environ 150 à 200 m.

Houiller

Deux faciès sont distingués dans le Houiller inférieur (H1):

- H1a: phanites, schistes siliceux et ampélites, sans houille. Son épaisseur est de l'ordre de 10 à 20 m.
- H1b: grès souvent feldspathiques, grès micacés, schistes, houille maigre.

Sur la nouvelle carte géologique, la puissance du Groupe Houiller a été estimée à plusieurs centaines de mètres (minimum 400 m à Atrain à l'est de Clavier)(comm. orale, JM Marion, 2015).

III.2.1.2. Formations du Cénozoïque

III.2.1.2.1 Paléogène

Il subsiste quelques **dépôts sableux** datant de l'Oligocène (Om, On). Ils comblent les paléokarsts affectant les calcaires carbonifères. Ces dépôts, assez hétérogènes, sont composés de sables quartzeux souvent micacés, fins à moyens, sans stratification précise et, parfois avec des lentilles argileuses et des amas de cailloux. Ces poches ont une extension très variable (quelques mètres à quelques dizaines de mètres).

III.2.1.2.2 Quaternaire

Les **alluvions modernes** (alm), localisées dans les fonds de vallée, sont formées de limon argileux, de silt, de sable et de gravier. Leur épaisseur est très variable, de quelques décimètres à un ou deux mètres.

D'**autres dépôts quaternaires** sont aussi observés sur la carte Modave-Clavier. Ils ne sont pas cartographiés sur la carte hydrogéologique. Une couverture constituée par des limons d'origine éolienne (loess) s'étend sur l'ensemble de la région avec des épaisseurs variables selon l'endroit (pente douce ou replat et pente raide).

III.2.1.3. Comparaison entre l'ancienne et la nouvelle nomenclature géologique

Le Tableau III.1 dresse la comparaison entre la carte géologique au 1/40.000, dressée par Lohest et *al.* (1902) et la nouvelle échelle lithostratigraphique adoptée par la carte géologique de Wallonie au 1/25.000 (Bultynck & Dejonghe, 2001). La carte géologique de Modave-Clavier a été levée en 2003/2004 par L.Barchy et JM.Marion. Cette carte devrait être publiée prochainement.

Tableau III.1: Comparaison entre l'ancienne carte géologique au 1/40.000 (1902) et la nouvelle nomenclature géologique – Modave-Clavier

Carte SGB n°157 Lohest, Forir, Mourlon (1902)		Nouvelle nomenclature (Poty et <i>al.</i> in Bultynck & Dejonghe, 2001; comm. orale JM Marion, 2015)			
Assise	Abréviation	Formation		Abréviation	
	alm, ale, e, tf	Alluvions modernes		AMO	
	On ----- Om	Dépôt sableux		SBL	
	H1b	Groupe houiller		HOU	
	H1a				
Visé	V2c	Groupe du Hoyoux	Anhée	HOY	ANH
			Bonne		BON
	Grands Malades Viséen moyen		GMA		
	V2b	Lives		LIV	
	V2a	Neffe		NEF	
Dinant	V1b	Terwagne base du Viséen		TER	
		Waulsort Tournaisien	Longpré Tournaisien	WAU	LPR
	Martinrive Tournaisien		MRT		
	V1a				
Ecaussines et Waulsort	T2b	Ourthe		OUR	
	T2a	Yvoir		YVO	
Hastière	T1ch	Maurenne		MAU	
	T1c	Landelies		LAN	
	T1b	Groupe d'Anseremme	Pont d'Arcole	ANS	PDA
	T1a		Hastière		HAS
Comblain-au-Pont	Fa2d	Comblain-au-Pont		CLP	MECL
Evieux	Fa2c	Evieux		EVX	
Montfort	Fa2b	Montfort		MFT	
Souverain-Pré	Fa2a	Souverain-Pré		SVP	
Esneux	Fa1c	Esneux		ESN	
Mariembourg	Fa1b	Aye		AYE	
Senzeilles	Fa1a	Famenne		FAM	

III.2.2. Cadre structural

La carte de Modave-Clavier appartient au Synclinorium de Dinant, vaste structure allochtone plissée (direction générale des plis: WSW-ENE). Deux sous-unités géomorphologiques se distinguent sur le territoire de la carte (Figure III.2). Du nord au sud, on observe:

- le Condroz: unité définie par une succession régulière de synclinaux calcaires et d'anticlinaux grésos-psammitiques, généralement droits, parfois déjetés vers le nord.
- la transition Condroz-Famennien: unité argilo-silteuse et silto-gréseuse d'âge famennien, avec des plis déjetés à déversés vers le nord.

Les couches observées sur la carte Modave-Clavier présentent une direction générale NE-SW avec des pendages souvent supérieurs à 50° en direction du nord-ouest ou du sud-est. De très nombreux plis sont observés (voir coupe géologique et Figure III.2). Les cœurs des anticlinaux sont généralement constitués par des formations du Famennien et ceux des synclinaux par des calcaires du Viséen supérieur et, plus localement par des schistes et grès du Houiller. Ces plis présentent généralement des structures, successivement anticlinales et synclinales, avec un double ennoyage. Ce dernier est orienté vers le nord-est dans la partie occidentale et vers le sud-ouest dans la partie orientale. Ces plis ont donné naissance à un relief conforme⁶. Ainsi, les crêtes topographiques sont localisées au droit des axes de plis anticlinaux composés de grès famenniens, (anticlinaux de Havelange, de Borlon...) et les dépressions sont localisées au droit des axes de plis synclinaux composés de calcaires tournaisiens ou viséens (Ruisseau de Vyle, de Pailhe...). Localement, on observera un relief inverse formé par des synclinaux houillers "perchés" (synclinaux de Bois-et-Borsu, de Bende, de Linchet). L'ensemble décrit une ondulation brachysynclinale suite à un plissement transverse, orientée NNW-SSE et localisé approximativement au droit de la vallée du Hoyoux.

La région, dont le contexte structural est relativement complexe, peut être subdivisée en plusieurs entités distinctes. Ainsi du nord-ouest au sud-est, on observe (Figure III.2):

- le synclinal faillé de Marchin, drainé par le ruisseau du Triffoiy, est limité au sud par la faille de Goesnes.
- le synclinal faillé de Vyle-et-Tharoul, drainé par le ruisseau de Vyle, est coincé entre deux failles, Goesnes au nord, Pont-de-Bonne au sud.
- l'entité de Modave se compose de trois synclinaux. Du nord au sud, on a:
 - le synclinal de Pailhe-Modave-Linchet dont le cœur est, vers l'est, constitué de phanites et de schistes du Houiller.
 - le synclinal de Petit-Modave est limité au nord par l'anticlinal d'Ossogne dont les formations famenniennes disparaissent vers l'est en raison de l'ennoyage important.

⁶ Le terme "conforme", dans son sens géologique, qualifie une forme de relief dont la disposition est calquée sur celle des structures géologiques. Ainsi les sommets correspondent aux voûtes anticlinales et les vallées aux synclinaux (Foucault & Raoult, 2000)

- le synclinal des Avins est limité par les anticlinaux de Havelange-Seny au nord et de Bouillon-Pair au sud. En raison de l'engorgement des structures formant un brachysynclinal, le cœur famennien des anticlinaux n'affleure qu'aux extrémités ouest et est de la carte.

- l'entité de Bois-et-Borsu – Clavier – Bende présente une structure complexe formée d'un système de plis parallèles, affecté de plis transverses engendrant des doubles ennoyages. Les formations du Houiller constituent localement le cœur de divers synclinaux.
- l'anticlinal de Borlon à cœur famennien inférieur. Cette entité appartient à la transition Condroz-Famenne. Cet anticlinal, légèrement déjeté, est limité au nord par la Faille de Bonsin avec un rejet inverse variable (Barchy et Marion, sous presse). Cet accident longitudinal d'orientation NE-SW n'est pas repris sur l'ancienne carte géologique.

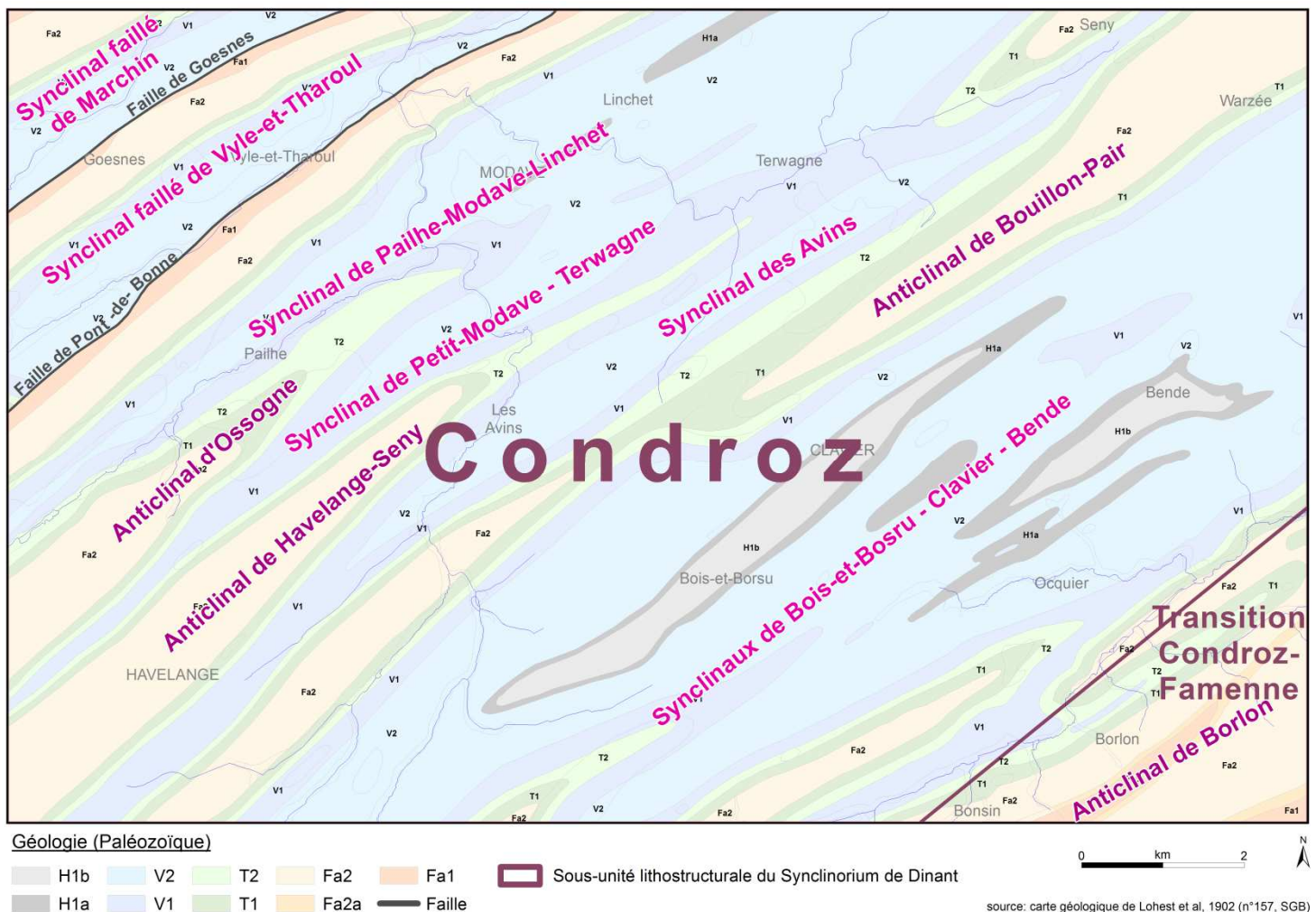


Figure III.2: Schéma structural du socle de la carte Modave-Clavier

Outre les plis, la région est intensément fracturée. Trois familles d'accidents tectoniques peuvent être distinguées:

- les failles longitudinales (dont seulement deux sont reprises sur la carte géologique de 1902): failles de chevauchement, subparallèles, orientées NE-SW, elles présentent une inclinaison vers le SE, de l'ordre de 50°. Il s'agit des failles de Goesnes et de Pont-de-

Bonne. D'autres failles longitudinales, de moindre importance, ont été repérées lors du levé de la nouvelle carte géologique (Barchy et Marion, sous presse). Il faut noter aussi qu'au sud du Condroz, un autre accident longitudinal important, d'orientation NE-SW avec un rejet inverse est repris sur la nouvelle carte géologique (faille de Bonsin).

- les failles transversales NNW-SSE à N-S: failles ou faisceaux de failles très redressées avec un rejet pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres. Leur orientation varie selon la courbure des plis, tout en restant perpendiculaire à leur axe. Ces failles sont mises en évidence par l'étude des linéaments ou par la prospection géophysique (LGIH, 1986; Di Clemente & Laurent, 1986; Dreze, 1997; Robert & Nguyen, 2007).
- les failles et les fractures obliques d'orientations diverses.

IV. CADRE HYDROGEOLOGIQUE

A l'échelle de la Wallonie, les ressources en eau souterraine de la carte Modave-Clavier sont une des réserves régionalement importantes. Les aquifères calcaires du Carbonifère et, accessoirement, les aquifères gréseux du Famennien qui y affleurent sont largement exploités. La majorité des prélèvements en eau souterraine est acheminée hors du territoire de la carte étudiée, vers la région bruxelloise surtout. Ces nappes sont également exploitées au niveau local afin d'alimenter en eau les localités de la région (Gesels et *al*, 2014).

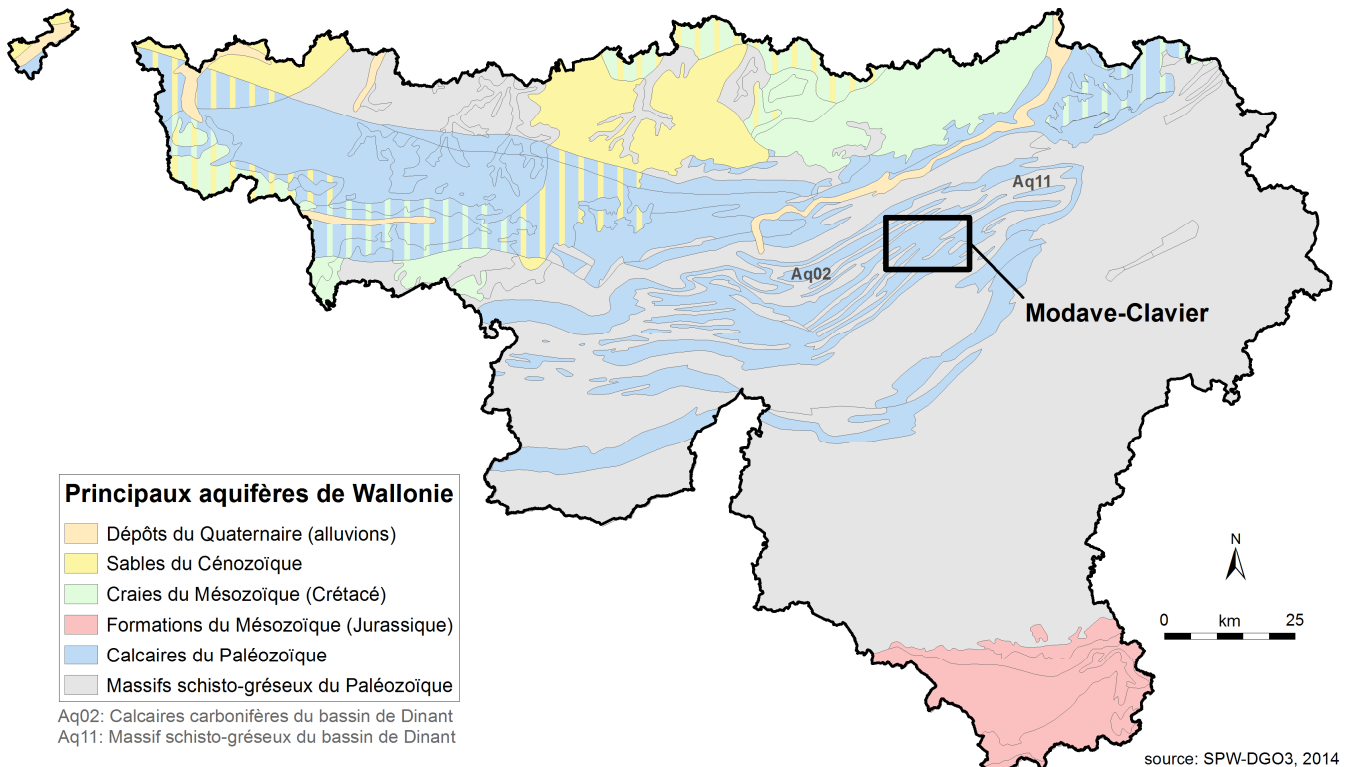


Figure IV.1: Principaux aquifères de Wallonie – Carte de Modave-Clavier (SPW-DGO3, 2014; modifié)

Quelle que soit la formation géologique, l'eau souterraine y est présente. Cependant, le comportement des eaux souterraines et la productivité sont fortement conditionnés par la nature et la structure de la roche dans laquelle l'eau est stockée. Ainsi, les formations géologiques sont regroupées/subdivisées en fonction de leurs caractéristiques hydrodynamiques. Trois termes sont utilisés pour décrire les unités hydrogéologiques selon le caractère plus ou moins perméable des formations (Pfanckuch, 1990; UNESCO-OMM, 1992):

- **Aquifère:** formation perméable contenant de l'eau en quantités exploitables;
- **Aquitard:** formation semi-perméable permettant le transit de flux à très faible vitesse et rendant la couche sous-jacente semi-captive;
- **Aquiclude:** couche ou massif de roches saturées de très faible conductivité hydraulique et dans lequel on ne peut extraire économiquement des quantités d'eau appréciables.

Ces définitions, assez subjectives, sont à manipuler avec précautions. Elles sont utilisées ici afin de renseigner, à une échelle régionale, le caractère globalement perméable, semi-perméable ou peu perméable d'un ensemble de couches géologiques. Elles donnent une idée du potentiel d'exploitation des différentes unités hydrogéologiques. Elles se basent sur la description lithologique de ces unités (formations ou ensembles de formations). Certaines formations géologiques voient leur faciès changer latéralement, il est donc probable qu'une même formation soit définie en terme d'aquifère sur une carte et en termes d'aquitard sur une autre carte (raisonnement par carte).

Il est important de noter également que la plupart des différentes formations exposées sur le territoire couvert par la carte sont constituées de roches cohérentes dont le potentiel hydrogéologique dépend fortement du degré de fracturation-fissuration et/ou d'altération. Les failles, fréquemment minéralisées, peuvent constituer, selon la nature de leur remplissage, des zones de circulation préférentielles des eaux souterraines.

IV.1. DESCRIPTION DES UNITES HYDROGEOLOGIQUES

Au sein des roches cohérentes, la fissuration et l'altération peuvent modifier leur perméabilité. La fracturation va créer un réseau de fractures favorisant la circulation de l'eau. L'altération des roches induit des comportements différents selon leur lithologie. Trois comportements principaux se présentent:

- la roche est un carbonate: l'altération entraîne une dissolution de la roche et un agrandissement du réseau de fractures existant. La perméabilité est augmentée.
- la roche est un grès ou un quartzite: l'altération donne du sable, ce dernier présente une plus grande porosité efficace et la perméabilité est donc augmentée.
- la roche est un shale/schiste: l'altération donne une argile qui colmate le réseau de fractures. La perméabilité est diminuée.

Les unités hydrogéologiques définies sur la carte Modave-Clavier sont décrites ci-dessous dans l'ordre stratigraphique. Elles sont reprises de manière synthétique en fin de chapitre (tableau IV.1).

IV.1.1. Unités hydrogéologiques du Dévonien

Deux unités hydrogéologiques sont définies parmi les terrains du Dévonien affleurant sur la carte Modave-Clavier.

IV.1.1.1. *Aquitard du Famennien*

Les lithologies rencontrées dans les Assises d'Esneux (Fa1c) et de Souverain-Pré (Fa2a) les définissent en tant qu'aquitard du Famennien. Ces terrains où alternent des grès et grès micacés avec des niveaux schisteux et schisto-gréseux, peuvent présenter des potentialités aquifères intéressantes mais d'intérêt local, lorsque leur degré d'altération et de fissuration le permet. Sur la majorité du territoire de la carte Modave-Clavier, l'Assise de Souverain-Pré est cartographiée avec l'ensemble du Famennien supérieur. Elle est donc, sur cette carte, associée à l'aquifère des grès du Famennien, sauf dans la zone de Borlon où elle est classée en aquitard. Notons que l'Assise de Souverain-Pré renferme des niveaux plus carbonatés augmentant localement la perméabilité des terrains.

A la base de cette unité hydrogéologique, se trouve l'Assise de Mariembourg (Fa1b). Cette assise, d'après la carte géologique de Lohest *et al.* (1902), est très peu présente dans la région de Modave-Clavier. Elle est dominée par des schistes et contient par endroit des grès micacés. Cette lithologie justifie donc l'appellation d'aquiclude. Cependant, elle est regroupée cartographiquement dans le Famennien inférieur (Fa1).

IV.1.1.2. *Aquifère des grès du Famennien*

L'aquifère des grès du Famennien est globalement l'une des ressources en eaux souterraines importantes en Wallonie. Ces nappes sont généralement libres. Cet aquifère affleure sur environ 20% du territoire couvert par la carte Modave-Clavier.

Cette unité hydrogéologique est formée des assises du Famennien supérieur, cartographiées ensemble: Comblain-au-Pont, Evieux, Montfort et Souverain-Pré. Elle est formée principalement de grès micacés et de grès quartzitiques alternant avec quelques horizons schisto-gréseux ou schisteux. Ces terrains peuvent contenir un aquifère relativement important. La porosité des grès assure une capacité importante à cette nappe, mais son exploitabilité dépend fortement de la perméabilité influencée essentiellement par la fracturation. Elle est qualifiée de "nappe de fissures" dans les grès fracturés. Dans la frange sous-jacente à la pénéplation post-paléozoïque, l'altération des grès en sable génère une porosité d'interstices conférant à l'aquifère un potentiel accru et un pouvoir de filtration efficace assurant une eau de bonne qualité.

Au sommet du Famennien, se trouve la Formation de Comblain-au-Pont (ou Strunien). Bien que caractérisée par des épisodes carbonatés et par des intercalations de shales et siltites, elle est intégrée à cette unité hydrogéologique. Les calcaires gréseux et les grès carbonatés, caractérisés par une matrice calcaire, vont influencer sur la minéralisation des eaux issues de cette nappe (augmentation de la conductivité électrique et de la dureté, pH plus basique). Les horizons plus schisteux, moins perméables, vont localement isoler l'aquifère des grès du Famennien de l'aquifère calcaire du Tournaisien.

L'aquifère des grès du Famennien, souvent en position topographique haute, alimente les nappes calcaires du Carbonifère situées en contrebas, via les écoulements de surface, le manteau d'altération et les zones de fracturation transversale aux couches.

A l'ouest, sur la carte Gesves-Ohey (Sorel et *al*, 2015), le Famennien supérieur est considéré comme aquitard. La description lithologique des terrains renseignée par la carte géologique parle surtout de grès à ciment argileux (psammites). De plus, comme sur la présente carte, l'Assise de Souverain-Pré n'est pas individualisée des autres assises du Famennien inférieur. Avec l'édition des nouvelles cartes géologiques, cette discontinuité entre les deux cartes hydrogéologiques sera sans doute levée.

IV.1.2. Unités hydrogéologiques du Carbonifère

Trois unités hydrogéologiques sont définies parmi les terrains du Carbonifère affleurant sur la carte Modave-Clavier. Elles occupent environ 70 % de la superficie de la carte.

IV.1.2.1. Aquifère – Aquitard – Aquiclude de l'Hastarien

Vu l'hétérogénéité des formations présentes au Tournaisien inférieur (Assise d'Hastière, T1) et leur regroupement cartographique, une unité hydrogéologique globale a été définie: "Aquifère-Aquitard-Aquiclude de l'Hastarien".

Sur la carte géologique de Lohest et *al* (1902), le Tournaisien inférieur est divisé en quatre sous-assises:

- *T1a* peut être considéré comme aquifère, voire aquitard selon l'importance des niveaux schisteux intercalés. Cette sous-assise est intercalée entre les couches schisto-gréseuses

du Famennien supérieur et les schistes de *T1b*. L'extension de ce niveau aquifère est limitée en raison de sa faible épaisseur et de la présence de couches peu perméables à sa base et à son sommet.

- *T1b* (que l'on peut associer à la Formation de Pont d'Arcole), composé de schistes, constitue un seuil hydrogéologique au sein de l'aquifère des calcaires carbonifères. Cet aquiclude forme un niveau peu perméable isolant l'aquifère sis dans *T1a* des autres unités hydrogéologiques calcaires du Carbonifère.
- *T1c* à dominante carbonatée, est aquifère. Hydrogéologiquement, cette assise forme un continuum avec l'aquifère logé dans les terrains du Tournaisien supérieur et du Viséen. Cependant, puisque cartographiquement il est regroupé dans l'Assise d'Hastière (*T1*), le *T1c* est intégré, comme *T1a*, *T1b*, *T1ch*, à l'unité hydrogéologique dénommée 'Aquifère-Aquitard-Aquiclude de l'Hastarien'.
- *T1ch*, composé de calcschistes et de calcaires argileux, forme un horizon aquitard au sein de l'aquifère calcaire. Cependant, sa présence dans la vallée du Hoyoux est remise en doute (voir chapitre III.2).

IV.1.2.2. Aquifère des calcaires du Carbonifère

Les calcaires du Tournaisien et du Viséen forment un aquifère de fissures, pouvant être localement karstifié, comme en témoignent les phénomènes karstiques observés dans la région. En raison du regroupement cartographique d'une partie des terrains du Tournaisien en une seule assise (*T1*) sur la carte Modave-Clavier, l'unité hydrogéologique 'Aquifère des calcaires du Carbonifère' sensu stricto comprend le Viséen (*V1* & *V2*) et le Tournaisien supérieur (*T2*).

D'une manière générale, les nappes calcaires karstiques sont alimentées selon deux modes distincts:

- par infiltration diffuse et retardée des eaux météoriques à travers la couverture de limons;
- par infiltration concentrée via les pertes et dolines.

La nappe logée dans les synclinaux calcaires du Carbonifère est aussi alimentée par le débordement de la nappe des grès du Famennien. Les eaux des grès décalcifiés du Famennien sont agressives vis-à-vis des calcaires générant des poches de dissolution dans les zones de débordement préférentiel de la nappe des grès, généralement associées aux axes de fissuration transverse.

IV.1.2.3. Aquiclude à niveaux aquifères du Houiller

Les schistes, grès et quartzites du Houiller sont peu perméables à l'échelle macroscopique. Leur porosité effective varie entre 0,5 et 1,5 %. L'eau n'y est mobile que dans les fissures ouvertes des bancs de grès et de quartzites tectonisés et fracturés. Dans les schistes, les fractures sont généralement colmatées par un remplissage argileux.

Localement ces terrains houillers renferment donc une nappe de fissures localisée dans les horizons plus gréseux (aquifères locaux). Cette eau présente souvent une minéralisation élevée en fer et en sulfates, ainsi qu'un pH acide, liés à l'altération des sulfures de fer (pyrites) souvent abondants dans ces formations. Une couche d'argile d'altération, épaisse de 10 à 20 m, repose sur le sommet des formations du Houiller (désagrégation pré-Santonienne). Cette couche argileuse forme une barrière très peu perméable, renforçant le rôle de niveau de base pour les nappes supérieures et limitant le potentiel aquifère des terrains schisto-gréseux du Houiller.

IV.1.3. Unités hydrogéologiques du Cénozoïque

IV.1.3.1. Aquifère des sables de remplissage

Sur la carte Modave-Clavier, des dépôts sableux, datés de l'Oligocène, comblent les paléokarsts. Renfermant des lentilles argileuses et l'extension réduite des poches, les capacités de cet aquifère sont faibles. Ces dépôts constituent de petites nappes très locales, souvent temporaires. Elles peuvent jouer le rôle de filtre pour les nappes sous-jacentes.

IV.1.3.2. Aquitard limoneux (non cartographié)

Bien que non cartographiés sur la carte géologique et non repris dans le tableau synthétique 'Géologie-Hydrogéologie' du poster de la carte hydrogéologique, les limons participent au contexte hydrogéologique d'une région. Ces dépôts éoliens, épais de quelques décimètres à quelques mètres, jouent un rôle protecteur lors de l'infiltration des eaux météoriques: infiltration retardée dans le temps et effet de filtration. Cependant, cette couverture limoneuse n'est pas uniforme sur l'ensemble de la carte.

IV.1.3.3. Aquifère alluvial

Les alluvions modernes sont composées principalement de graviers et de sables offrant des potentialités aquifères intéressantes, si leur extension le permet. L'alimentation directe par les eaux météoriques est faible en raison de l'extension, souvent, négligeable de la plaine alluviale. Ainsi, la majeure partie de l'alimentation de ces nappes vient de l'apport des versants, soit par écoulement hypodermique, soit par le déversement de la nappe du bed-rock lorsque celui-ci est aquifère. On peut supposer également des interactions entre la nappe et la rivière, celle-ci n'étant pas (ou peu) canalisée.

Ere	Système	Série	Etage	Assise	Lithologie	Abréviation	Hydrogéologie				
Cénozoïque	Quaternaire	Supérieur			alluvions modernes des vallées, limons remaniés	alm, ale, e, tf	Aquifère alluvial				
		Inférieur	Moséen		limon, sable	q1	Aquitard limoneux (non cartographié)				
	Paléogène	Oligocène	Dépôts supérieurs continentaux		glaises, amas et trainées de cailloux de quartz	On	Aquifère des sables de remplissage				
			Dépôts inférieurs marins		sable quartzeux fin, pailleté, homogène	Om					
Paléozoïque	Carbonifère	Houiller	Inférieur		grès souvent feldspathiques, grès micacés, schistes - houille maigre	H1b	Aquiclude à niveaux aquifères du Houiller				
					phtanites, schistes siliceux - ampélites	H1a					
		Dinantien	Viséen	Visé		calcaire avec lits d'antracite	V2c	Aquifère des calcaires du Carbonifère			
						calcaire souvent très compact, parfois grenu	V2b				
						calcaire à grains cristallins, calcaire oolithique ou compact	V2a				
						calcaire à crinoïdes, généralement dolomitisé	V1b				
			Dinant			"marbre" noir de Dinant, en partie avec cherts, souvent dolomitisé	V1a				
						Ecaussinnes et Waulsort				calcaire à crinoïdes - petit "granit" de l'Ourthe et des Ecaussinnes	T2b
										calcaire d'Yvoir, avec crinoïdes et cherts	T2a
						Tournaisien	Hastière				calcschiste et calcaire argileux
		calcaire à crinoïdes de Landelies	T1c								
		schistes foncés	T1b								
		calcaire à crinoïdes, calcaire avec schistes intercalés	T1a								
		Dévonien	Supérieur	Famennien		Comblain-au-Pont	alternance de calcaire, schistes, grès micacés et grès à ciment calcaire	Fa2d	Aquifère des grès du Famennien		
						Evieux	grès micacés et schistes, avec grès à ciment calcaire ou schistes noduleux	Fa2c			
						Montfort	grès micacés massifs à pavés vers le haut, avec couches stratoïdes vers le bas	Fa2b			
Souverain-Pré	grès à ciment calcaire ou schistes noduleux, avec grès micacés et schistes vers le haut					Fa2a	Aquitard				
Esneux	grès micacés stratoïdes et schistoïdes					Fa1c	Aquitard du Famennien				
Mariembourg	schistes souvent violacés avec grès micacés					Fa1b	Aquiclude				

Tableau IV.1: Tableau de correspondance entre la géologie et l'hydrogéologie – Modave-Clavier

IV.2. DESCRIPTION DE L'HYDROGEOLOGIE DE LA CARTE

Le schéma hydrogéologique général de la carte Modave-Clavier se présente comme suit:

- la région est constituée d'une succession de plis synclinaux dont le cœur est formé par des calcaires dinantiens et plus rarement par des schistes et grès du Houiller, et de plis anticlinaux formés généralement de grès famenniens;
- les formations gréseuses, généralement localisées sur les crêtes topographiques, constituent des nappes, parfois perchées d'extension et de capacité limités, qui alimentent, par infiltration diffuse au droit des failles et fractures ou via les eaux de surface, les aquifères calcaires situés en contrebas. Les directions d'écoulement des eaux souterraines dans ces aquifères sont dépendantes de la topographie;
- les aquifères calcaires, fissurés et localement karstifiés, sont drainés, en raison des ennoyages, suivant une direction NE-SW, en direction de l'Ourthe pour la partie orientale de la carte ou en direction du Hoyoux pour la partie occidentale.

Les ressources en eau souterraine de la région se logent essentiellement dans les aquifères calcaires du Carbonifère. Quatre principaux aquifères calcaires, individualisés d'un point de vue hydrogéologique, se distinguent. Par la suite, un découpage en entités hydrogéologiques, à l'image du schéma litho-structurale de la carte, est adopté pour décrire le cadre hydrogéologique de la carte Modave-Clavier (Figure IV.2).

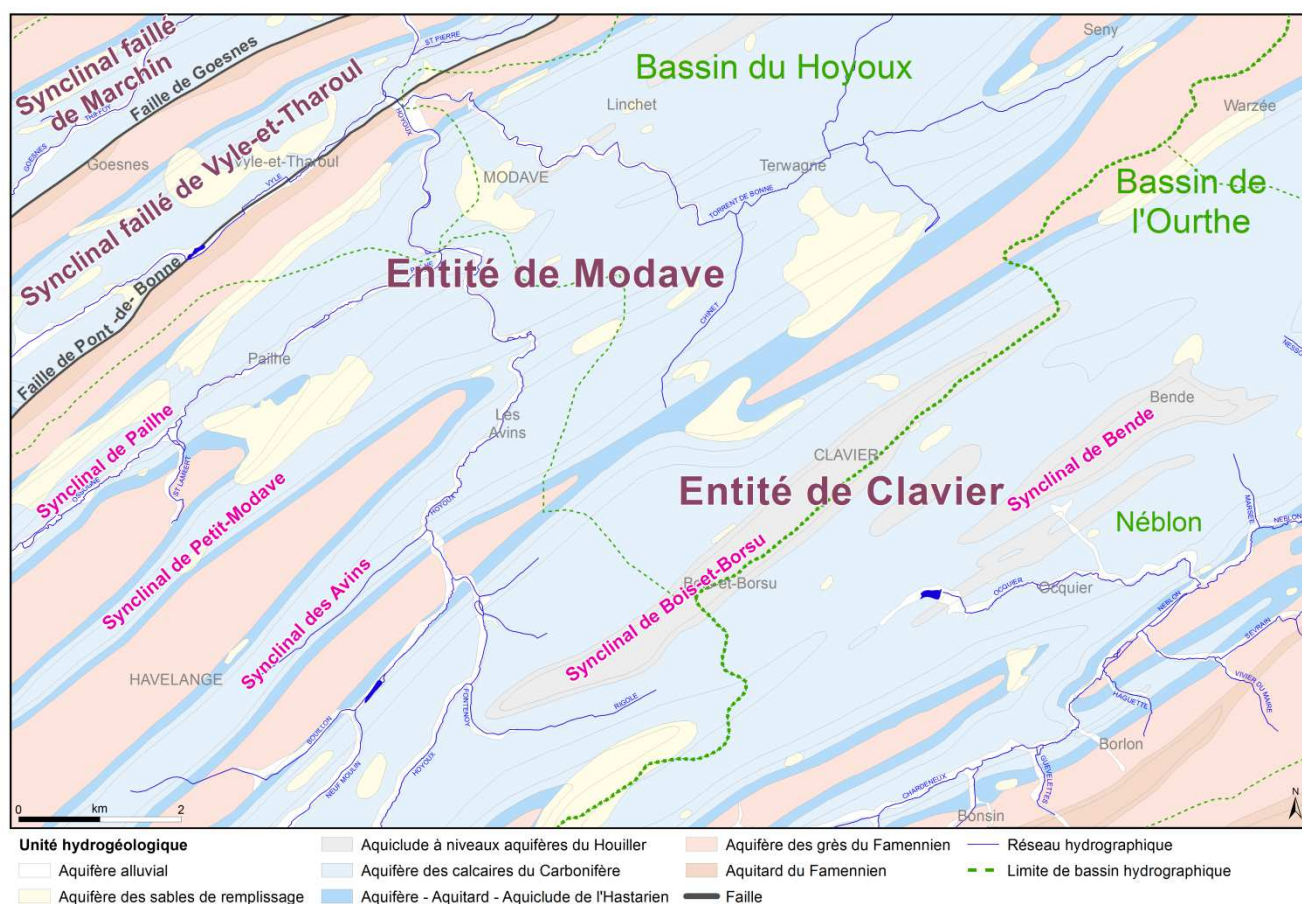


Figure IV.2: Entités hydrogéologiques de la carte Modave-Clavier

Les synclinaux calcaires du Carbonifère (et les anticlinaux gréseux du Famennien) du Synclinorium de Dinant, constituant l'une des importantes réserves en eau souterraine de la Wallonie, ont fait l'objet de plusieurs études régionales et locales. Ces aquifères calcaires sont alimentés par l'infiltration des eaux météoriques à travers les terrains de couverture mais aussi par l'éventuel débordement diffus ou concentré des nappes gréseuses voisines vers les dépressions calcaires et le ruissellement des précipitations sur les terrains schisto-gréseux du Famennien. Les aquifères calcaires de la carte Modave-Clavier ont été beaucoup étudiés (études régionales, délimitation des zones de prévention...). De nombreuses données sont ainsi disponibles, permettant une caractérisation hydrogéologique approfondie. Comparativement, les aquifères gréseux de la carte ont été très peu étudiés.

Une vaste étude de caractérisation hydrogéologique des différentes masses d'eau souterraine wallonne a été entreprise par le SPW (Brouyère et al, 2009, Leroy et al, 2010). La carte Modave-Clavier fait entièrement partie de la zone couverte par cette étude, nommée "Projet Synclin'EAU". Quelques-unes des conclusions les plus pertinentes seront présentées dans ce chapitre.

Les phénomènes karstiques sont également abordés dans ce chapitre. Ils se situent essentiellement dans la vallée du Hoyoux. Néanmoins, quelques manifestations karstiques localisées dans le bassin du Néblon jouent un rôle important dans le contexte hydrogéologique local.

IV.2.1. Synclinal faillé de Marchin

Situé dans le coin nord-ouest de la carte Modave-Clavier, le synclinal calcaire de Marchin est limité au sud par la faille de Goesnes (Figure IV.3). Au nord, il est limité par les formations calcschisteuses et schisteuses de l'Hastarien et par les formations gréseuses du Famennien.

Ce synclinal est parcouru par le ruisseau du Triffoy, appelé aussi ruisseau de Goesnes. Au nord, en dehors de la carte étudiée, il est recoupé perpendiculairement par le Hoyoux. Cette rivière constitue l'exutoire principal de la nappe logée dans les formations calcaires. A l'ouest, la limite hydrographique du Hoyoux, recoupant aussi perpendiculairement le synclinal, ne correspond pas à la limite hydrogéologique. Cette dernière semble légèrement décalée vers l'est. Ainsi une petite partie des eaux infiltrées dans le bassin du Hoyoux s'écoule en souterrain vers le bassin du Samson (Brouyère et al, 2009).

Le captage de Marchin, source de 'Chemin de Jamagne', appartient à VIVAQUA. Cette prise d'eau par gravité n'induit pas de perturbation majeure à la surface piézométrique de la nappe des calcaires, même si maintenant une partie des écoulements souterrains est interceptée par le captage et ne rejoint donc plus le Hoyoux. L'écoulement souterrain se fait depuis le sud-ouest vers le nord-est, vers le Hoyoux. Le gradient hydraulique est relativement faible ($\approx 0,6\%$).

Une succession de jaugeages le long du ruisseau du Triffoy a permis de mettre en évidence des tronçons drainants, sur la partie aval et des tronçons perdants (infiltrants) sur la partie amont. Le comportement hydraulique est très dépendant des conditions météorologiques

(pluies) et donc piézométriques. Par moments, le toit de la nappe est nettement plus bas que le ruisseau (parfois tari). A d'autres moments, le niveau piézométrique remonte fortement et on constate un écoulement de surface dans le ruisseau.

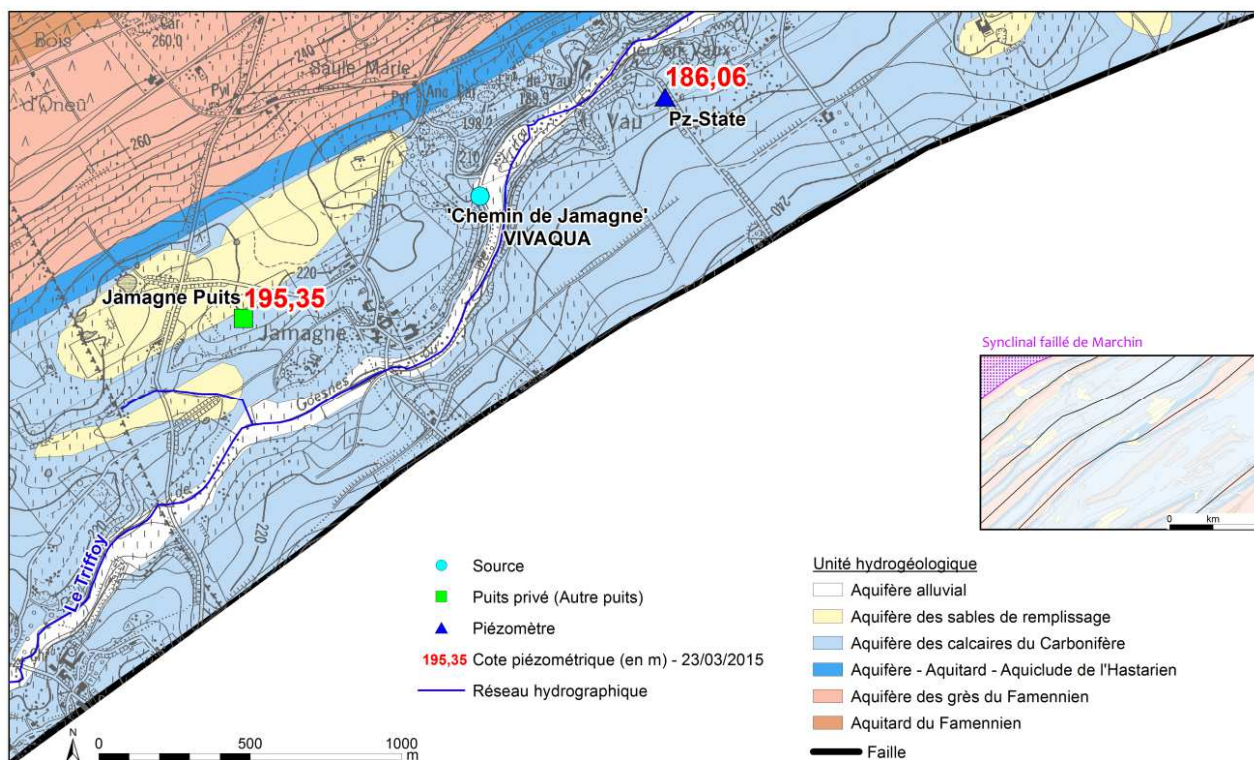


Figure IV.3: Synclinal faillé de Marchin sur la carte Modave-Clavier

Des mesures piézométriques sont réalisées régulièrement dans deux puits implantés dans le synclinal de Marchin (Figure IV.3). Le puits Jamagne appartient à un particulier mais n'est pas exploité. Le relevé effectué entre 2006 et 2008 montre un décalage d'un mois entre les précipitations (et donc la recharge) et la remontée de la nappe (Figure IV.4). Les fluctuations du niveau piézométrique à cet endroit sont d'environ 2 m (Brouyère *et al*, 2009).

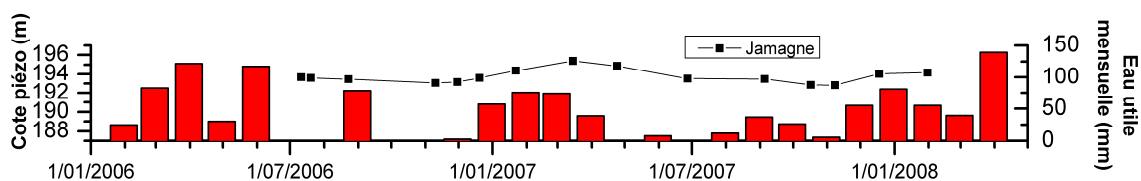


Figure IV.4: Mise en relation de la variation piézométrique avec l'eau utile mensuelle calculée pour le puits de Jamagne (Modave-Clavier) (Brouyère *et al*, 2009)

Environ 700 m à l'aval du captage de VIVAQUA, un piézomètre, Pz-State d'une profondeur de 42 m, a été foré en octobre 2013 (Brouyère *et al*, 2015a). Dès juillet 2014, le niveau piézométrique est suivi quotidiennement (capteur de pression hydrostatique). Une station météorologique temporaire a été installée dans ce synclinal à Hodoumont (carte voisine, Gesves-Ohey). Ainsi, à partir des paramètres climatiques mesurés, la quantité d'eau utile⁷ a été

⁷ On entend, ici, par eau utile, la quantité d'eau disponible pour le ruissellement et l'infiltration (lame d'eau exprimée en mm).

calculée (Brouyère et al, 2015b). Toutes ces données sont mises en graphe (Figure IV.5). Sur la période d'observation, le comportement piézométrique de la nappe au droit des deux ouvrages est similaire. Le niveau piézométrique s'élève nettement dès le mois de décembre 2014, entre 2 et 3 m en 6 semaines. Cette période de hautes eaux se prolonge ensuite jusque février-mars. Dès le printemps, le niveau piézométrique baisse, parallèlement à la diminution d'eau utile disponible. Ce cycle saisonnier de hautes eaux / basses eaux est à confirmer avec une chronique de mesures piézométriques plus longue. La relation entre les variations du niveau piézométrique et la recharge est bien mise en évidence sur le graphique. En effet, le toit de la nappe remonte assez rapidement suite à un épisode pluvieux (2 à 4 semaines). Quand l'eau utile est moins importante (comme en novembre 2014), on constate que le niveau d'eau se stabilise ou tend, même, à légèrement baisser.

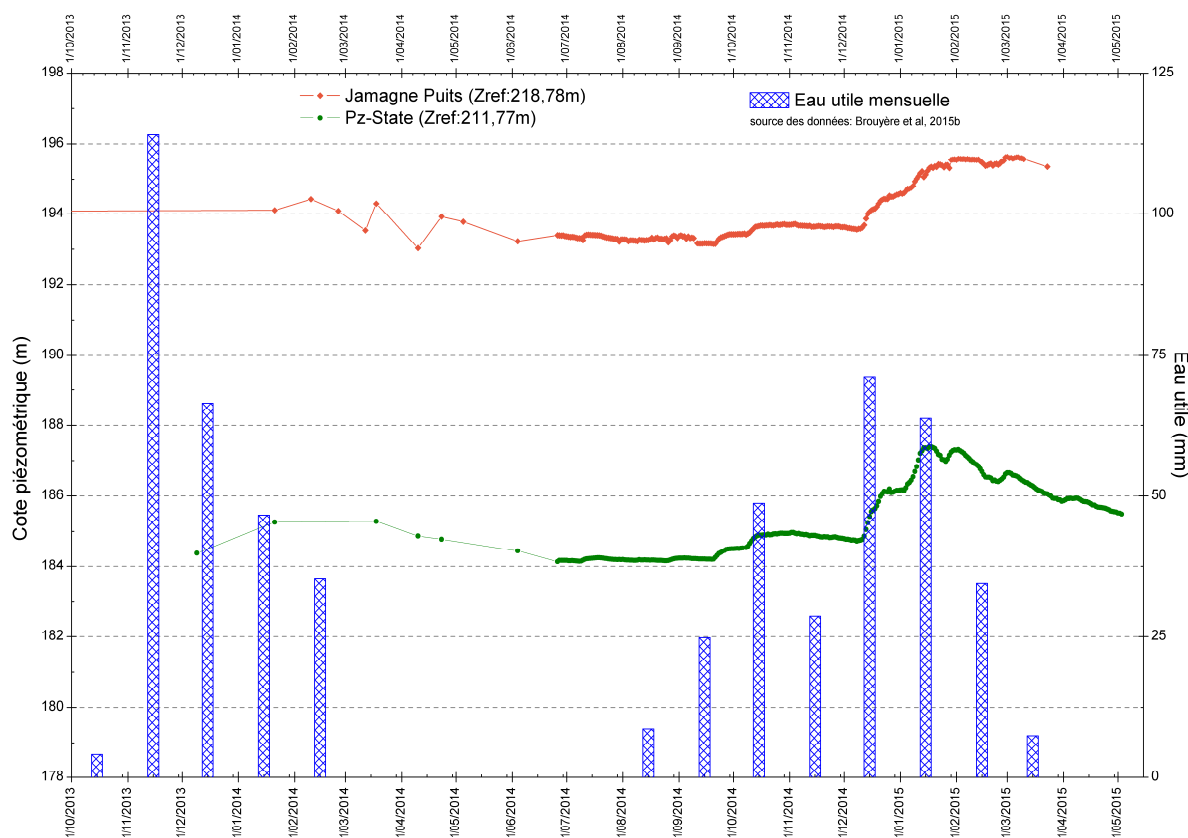


Figure IV.5: Mise en relation de la variation piézométrique avec l'eau utile mensuelle calculée pour le puits de Jamagne et le piézomètre State (Modave-Clavier)

IV.2.2. Synclinal faillé de Vyle-et-Tharoul

Situé au nord-ouest de la carte Modave-Clavier, le synclinal faillé de Vyle-et-Tharoul est limité, au nord, par les formations schisto-gréseuses du Famennien et, au sud, par la faille de Pont-de-Bonne (Figure IV.6). Comme le synclinal de Marchin, celui-ci est composé des unités hydrogéologiques du Carbonifère, contenant à la base un horizon calcschisteux et schisteux (Hastarien). Celui-ci joue le rôle de seuil hydrogéologique. Ce synclinal est, également, traversé du sud au nord par le Hoyoux. Ses affluents sont, en rive gauche, le ruisseau de Vyle et, en rive droite, le ruisseau Saint-Pierre.

Sur la carte Modave-Clavier, ce synclinal calcaire est peu exploité. Une seule prise d'eau, destinée à l'approvisionnement public d'eau potable, est recensée. Il s'agit de la galerie captante de la CILE, captage St-Pierre à Limet, dans la partie orientale du synclinal.

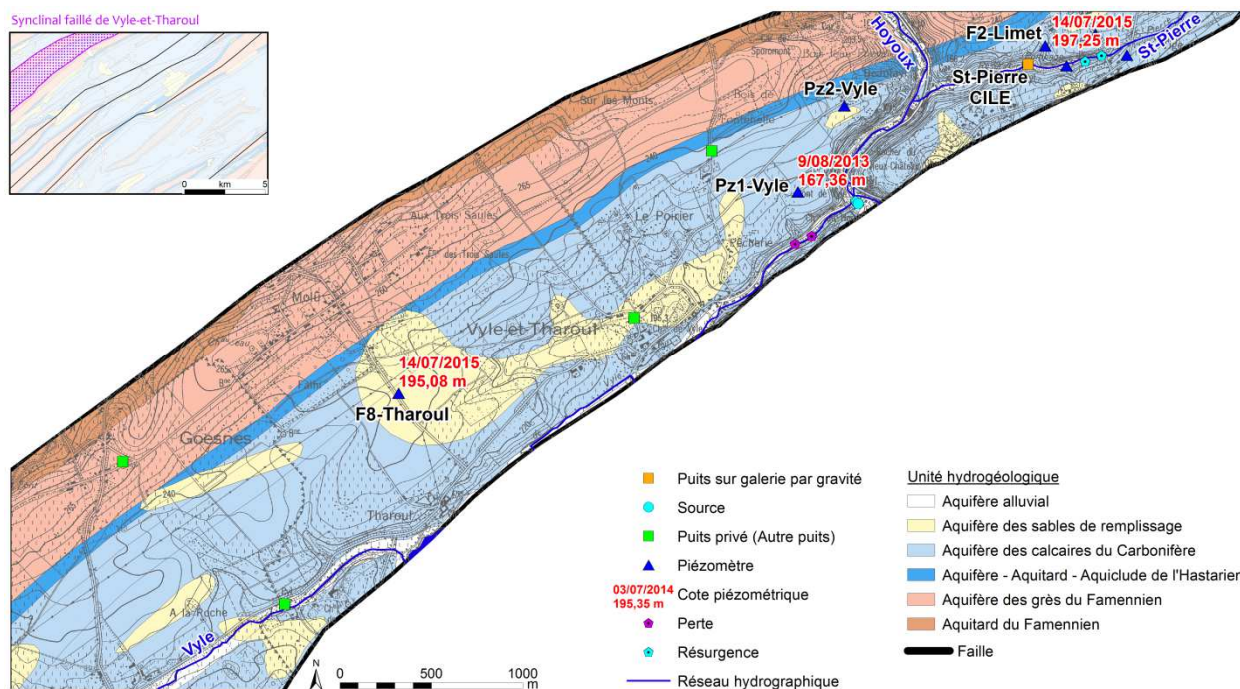


Figure IV.6: Synclinal faillé de Vyle-et-Tharoul sur la carte Modave-Clavier

Les eaux logées dans l'aquifère des calcaires carbonifères s'écoulent vers le Hoyoux, exutoire principal de la nappe. L'écoulement souterrain est dirigé, majoritairement, vers le nord-est dans la partie occidentale du synclinal et vers le sud-ouest dans la partie orientale.

Afin d'établir le périmètre des zones de prévention autour du captage St-Pierre de la CILE à Limet, une étude hydrogéologique a été menée (LGIH, 2000; 2002). Des forages ont été exécutés. Ensuite, des essais de pompage et de traçage y ont été réalisés, suivis d'une modélisation mathématique des écoulements et du transport dans la nappe. Depuis 2010, le piézomètre F2 fait partie du réseau de monitoring piézométrique du SPW. Sur la chronique piézométrique de ce forage (Figure IV.7), les périodes de hautes eaux et de basses eaux se distinguent nettement, tant dans un cycle saisonnier (annuel) que dans un cycle interannuel. Ainsi, annuellement, les eaux hautes se situent au printemps, tandis que les basses eaux ont lieu en automne-hiver. Sur un cycle pluriannuel, on constate des années de hautes eaux (les hivers 2007/2008, 2008/2009, 2010/2011, 2012/2013, 2014/2015). L'amplitude des fluctuations piézométriques est de 1 à 3 m, selon que l'on soit en année de hautes eaux ou de basses eaux.

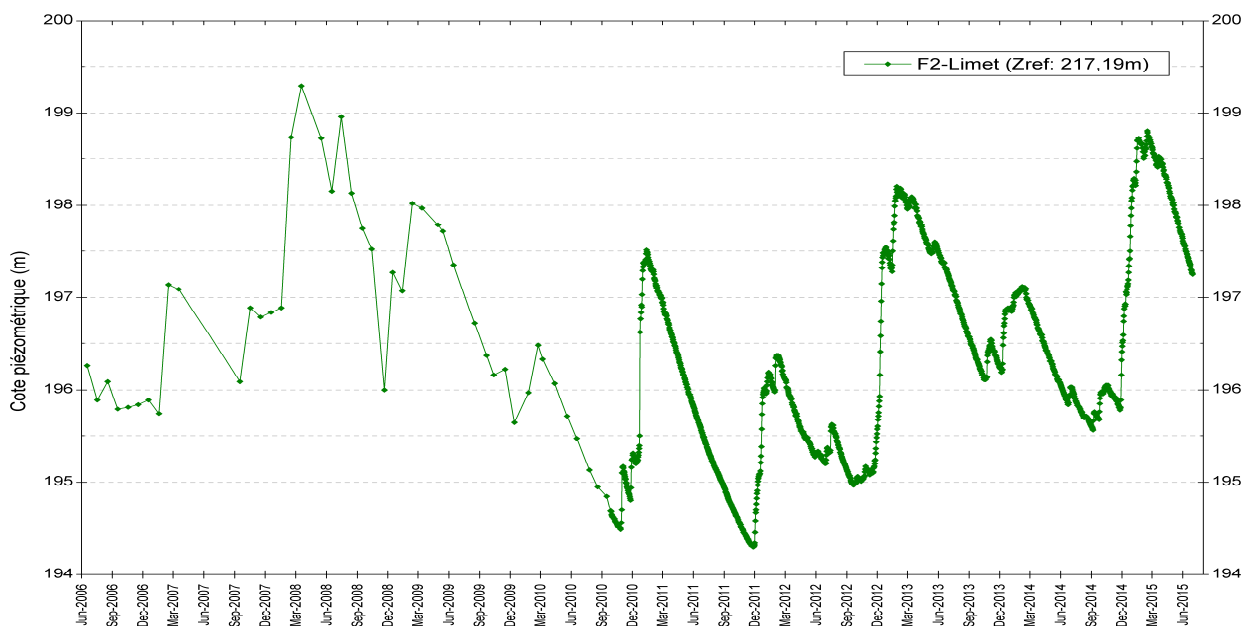


Figure IV.7: Fluctuations piézométriques de la nappe des calcaires du Carbonifère - Synclinal de Vyle-et-Tharoul (partie est)

Le niveau piézométrique de la nappe des calcaires de la partie ouest du synclinal faillé de Vyle-et-Tharoul est également suivi. Quelques forages sont (ou ont été) monitorés. De l'amont à l'aval, on a les piézomètres F8-Tharoul et Pz1 & Pz2-Vyle (Figure IV.6). Les fluctuations piézométriques de la nappe au droit du forage F8-Tharoul permettent de distinguer des périodes de hautes eaux, fin de l'hiver au printemps, et des périodes de basses eaux, généralement en automne (Figure IV.8). L'amplitude du niveau piézométrique varie, selon l'année hydrologique, de 3 à 7 m. Une cyclicité pluriannuelle semble aussi se marquer, avec des années de hautes eaux, comme les hivers 2008/2008, 2010/2011, 2012/2013, 2014/2015.

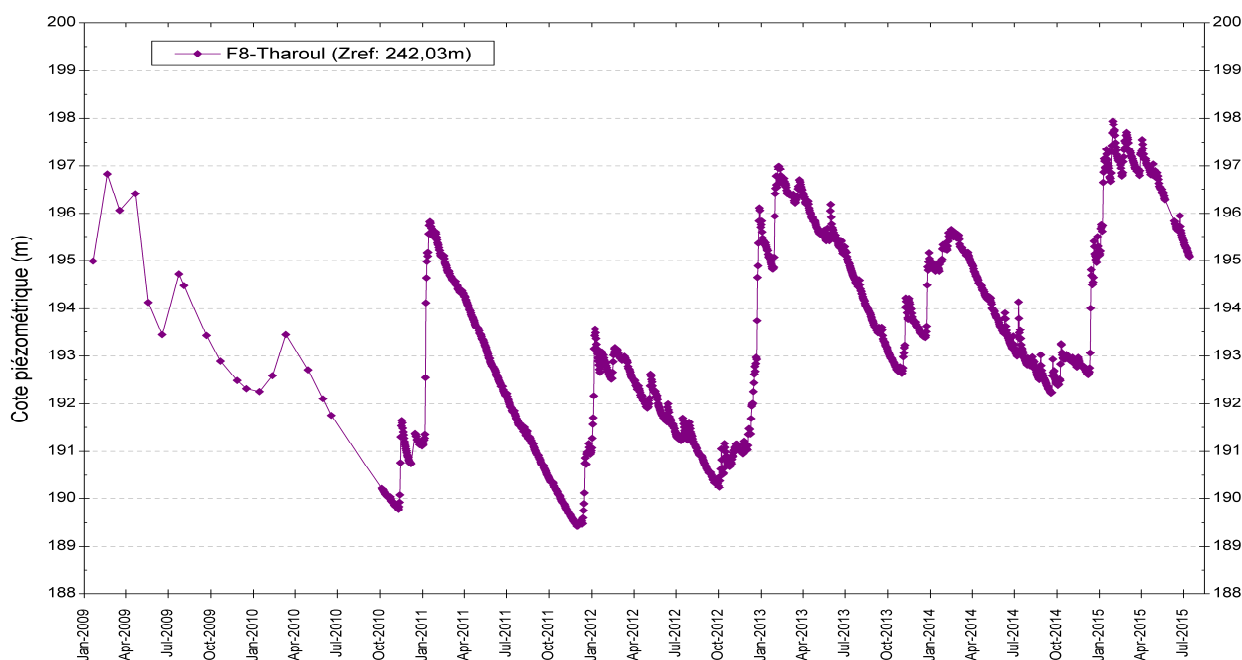


Figure IV.8: Fluctuations piézométriques de la nappe des calcaires du Carbonifère - Synclinal de Vyle-et-Tharoul (partie ouest)

Les piézomètres Pz1 & Pz2-Vyle sont implantés à l'extrémité aval du bassin du ruisseau de Vyle, à proximité du Hoyoux (Figure IV.6). Leur position permet de fournir des indications sur le comportement de la nappe des calcaires carbonifères à proximité de l'axe de drainage que constitue le Hoyoux. L'amplitude des fluctuations annuelles observées au droit du Pz1-Vyle est au maximum de 2,5 m, avec une réaction rapide à la recharge (Figure IV.9). En période de basses eaux, le niveau de la nappe (+/- 166,5 m) s'équilibre sur le niveau du Hoyoux dont la cote varie entre 170 m, à l'amont des formations calcaires et, +/- 160 m au droit du seuil hydrogéologique (Unité hydrogéologique de l'Hastarien). Les variations de niveau piézométrique sont clairement reliées à la recharge et non aux variations de niveau d'eau dans le Hoyoux. Par contre, l'amplitude piézométrique mesurée au Pz2-Vyle ne varie que d'un mètre annuellement. Ces variations sont synchrones avec la recharge. Cette amplitude plus faible laisse présager d'une proximité avec l'exutoire de la nappe et d'une connexion franche avec le Hoyoux (Brouyère et al, 2009).

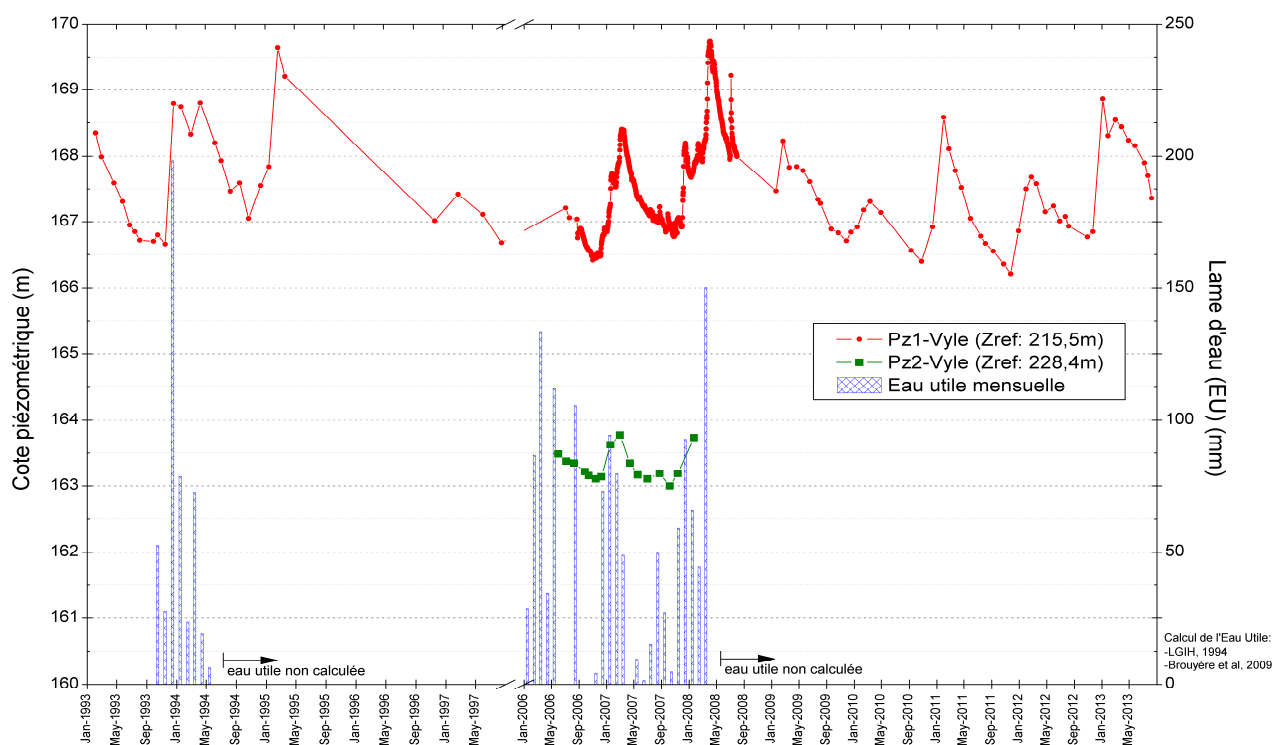


Figure IV.9: Mise en relation de la variation piézométrique avec l'eau utile mensuelle calculée pour Pz1-Vyle - Synclinal de Vyle-et-Tharoul (partie ouest)

Les jaugeages menés le long du ruisseau de Vyle indiquent que sur sa moitié amont, le ruisseau est drainant, vis-à-vis de la nappe des calcaires. Ensuite, le ruisseau devient perdant (infiltrant). Environ 500 m avant sa confluence avec le Hoyoux, le ruisseau de Vyle est l'objet de plusieurs pertes karstiques, l'asséchant presque complètement à certaines périodes de l'année. Les apports d'eau de surface vers la nappe des calcaires sont donc importants dans le bassin versant du ruisseau de Vyle (Brouyère et al, 2009).

IV.2.3. Entité de Modave

Occupant environ la moitié de la superficie de la carte et s'étirant du sud-ouest au nord-est, l'entité de Modave est, d'un point de vue hydrogéologique, assez bien caractérisée. Elle comprend trois synclinaux calcaires, séparés, dans la partie sud-ouest, par des anticlinaux fameniens. Vers l'est, suite à l'envoyage des plis (structure brachysynclinale), les formations fameniennes disparaissent et les synclinaux calcaires sont interconnectés (Figure IV.10). Cette entité hydrogéologique est limitée au nord par les formations du Tournaisien inférieur de composition schisteuse. L'unité hydrogéologique de l'Hastarien constitue un seuil hydrogéologique.

Le Hoyoux s'écoule du sud au nord et partage en conséquence l'entité de Modave en deux; la rivière draine donc les aquifères (exutoire naturel). De la sorte, les directions générales des écoulements souterrains sont soit vers le nord-est pour les aquifères situés en rive gauche, soit vers le sud-ouest pour ceux situés en rive droite du Hoyoux. Les principaux affluents du Hoyoux sont, en rive gauche, le ruisseau de Pailhe et le ruisseau des Avins (au sud). En rive droite, le Torrent de Bonne rejoint le Hoyoux à la bordure nord de l'entité hydrogéologique de Modave, à hauteur de Pont-de-Bonne.

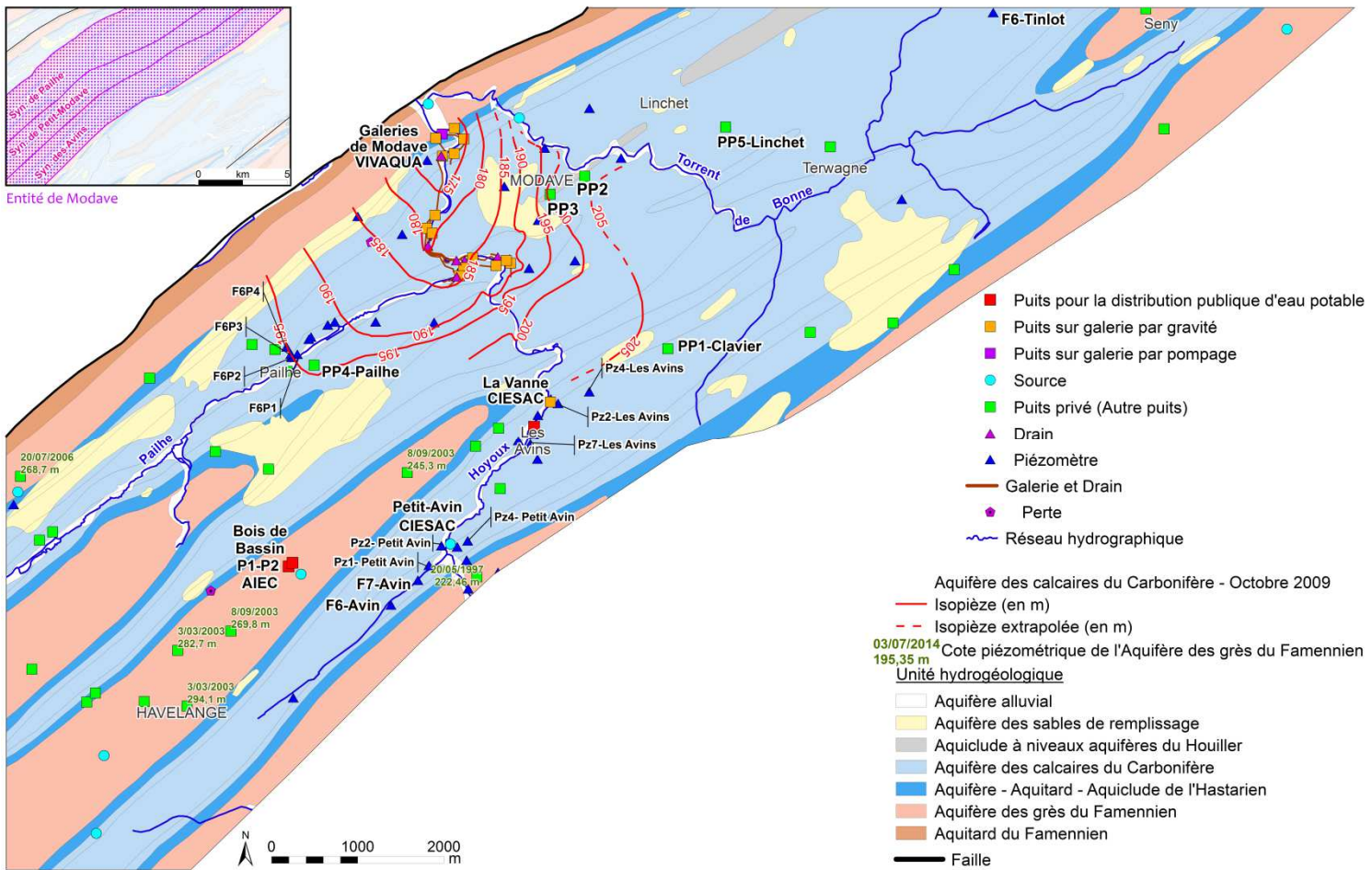


Figure IV.10: Entité hydrogéologique de Modave - Carte Modave-Clavier

Les eaux souterraines logées dans l'entité de Modave sont largement exploitées. Ce sont essentiellement les aquifères des calcaires du Carbonifère qui sont sollicités. D'aval en amont, on recense (Figure IV.10):

- le captage de Modave (VIVAQUA): ce réseau de galeries et de drains (longueur totale: 5,6 km) est creusé au niveau de la plaine alluviale du Hoyoux et débouche juste à l'amont du seuil hydrogéologique formé par l'aquifère-aquitard-aquiclude de l'Hastatien. Elles captent les eaux de l'aquifère des calcaires du Carbonifère;
- le captage 'La Vanne' (CIESAC): prise d'eau par gravité (galerie), implantée en bordure de la rivière dans le synclinal calcaire des Avins;
- le captage de Petit-Avin (CIESAC): nommée aussi Pré à la Fontaine, cette prise d'eau est une source qui sollicite également les eaux logées dans le synclinal calcaire des Avins;
- le captage de Bois de Bassin (AIEC): ces deux puits forés, situés sur la ligne de crête au nord d'Havelange, sollicitent les eaux logées dans l'aquifère gréseux du Famennien.

L'importante prise d'eau de VIVAQUA à Modave a conduit à une étude approfondie du contexte hydrogéologique de cette zone. Dès les années 1960, le niveau d'eau a été suivi dans quelques puits privés situés dans le bassin. Par la suite, des piézomètres ont été implantés dans l'aquifère des calcaires du Carbonifère, sur les versants est et ouest du Hoyoux. Des essais de pompage et des traçages ont été réalisés (LGIH, 1998; HGE-ULg, 2003; GEOLYS 2011, 2012).

Ecoulement des eaux souterraines: allure piézométrique de la nappe et interactions avec les eaux de surface.

Sur base de relevés piézométriques, des données hydrographiques et topographiques des cours d'eau et du radier des galeries, une carte piézométrique a été esquissée pour la période d'octobre 2009 (GEOLYS, 2011). Elle est présentée sur la carte principale du poster et reprise sur la carte de la figure IV.10. Quelques données ponctuelles datant de février 2013 sont également reportées sur la carte. Bien que le contexte hydrogéologique de cette zone soit complexe, cette interprétation piézométrique met néanmoins quelques faits:

- le Hoyoux joue le rôle d'exutoire naturel des aquifères. Il faut toutefois rappeler que, afin d'éviter des infiltrations depuis la rivière vers les galeries et drains, le Hoyoux est canalisé au droit des installations de VIVAQUA (sur une longueur de 3,5 km). Ainsi, les galeries remplissent ce rôle sur le tronçon entre Petit-Modave et la confluence avec le Torrent de Bonne;
- les directions générales de l'écoulement souterrain, présentées ci-dessus, peuvent être affinées:
 - en rive gauche (partie ouest), l'écoulement se dirige du sud-ouest vers le nord-est en direction du Hoyoux. Au sud du ruisseau de Pailhe, une composante sud-nord à sud-est / nord-ouest est observée;

- en rive droite (partie est), dans la zone éloignée du captage et de la rivière, l'écoulement souterrain est dirigé d'est en ouest. Ensuite, il prend une direction nord-ouest à proximité des galeries et du Hoyoux.
- des gradients piézométriques ont été déterminés:
 - en rive gauche, le gradient moyen maximal observé est de 1,25 %. Le gradient le plus faible est d'environ 0,8 %. Dans la partie sud (entre le Hoyoux et le ruisseau de Pailhe), le gradient moyen est de 1,9 %;
 - en rive droite, le gradient moyen maximal est de 2 %. Entre le Torrent de Bonne et le Hoyoux, un gradient plus élevé est observé, de l'ordre de 3,4 %, voire 6 % en période des hautes eaux.
- le caractère perché ou non perché, drainant ou infiltrant, des principaux affluents du Hoyoux ont été partiellement identifiés, pour la période d'observation (octobre 2009):
 - le ruisseau de Pailhe apparaît comme perché;
 - le ruisseau de Torrent de Bonne apparaît comme drainant dans sa partie aval (sur les grès famenniens) au moment de la campagne. Ce ruisseau pourrait être drainant en période de hautes eaux et infiltrant en période de basses eaux et modifier localement le sens de l'écoulement régional.
- dans la partie orientale de la zone, bien que disposant de peu de données, la nappe est située bien en-dessous du talweg de "Gros Buisson", descendant du plateau de Terwagne. Ce vallon, généralement sec, absorbe l'entièreté des eaux de ruissellement.
- le synclinal houiller, unité hydrogéologique peu perméable, joue certainement un rôle de barrière hydrogéologique. Peu de données sont disponibles. Cependant, le niveau piézométrique relevé dans un puits sollicitant cette nappe indique qu'elle est perchée. En février 2013, la cote piézométrique est 211,5 m dans le Houiller et comprise entre ≈195 m (en aval) et ≈205 m (en amont) dans l'aquifère des calcaires carbonifères.

Pour compléter le paragraphe ci-dessus, les conclusions de l'étude des interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines du projet Synclin'EAU (Brouyère et al, 2009) indiquent que le ruisseau de Pailhe est perdant toute l'année. Le ruisseau s'écoulant au droit du synclinal des Avins est également perdant par rapport à la nappe. Jusqu'au captage 'La Vanne', le Hoyoux est en pseudo-équilibre. Il devient ensuite clairement drainant. Dans son parcours sur les calcaires du Carbonifère, le Torrent de Bonne amont est perdant, son débit est nul durant de longues périodes exemptes de pluies intenses. Ensuite, il est en pseudo-équilibre avec la nappe (tantôt perdant, tantôt drainant). La composante principale de l'écoulement sur le bassin du Torrent de Bonne est donc la composante souterraine.

Dans la partie ouest du bassin, là où les synclinaux calcaires sont individualisés (synclinaux de Pailhe, de Petit-Modave et des Avins), les limites hydrogéologiques correspondent a priori aux limites hydrographiques. Il faut noter, cependant, que lors du calcul du bilan des bassins, tous ne ferment pas (Brouyère et al, 2009) de manière satisfaisante, montrant des transferts entre bassins hydrographiques. Dans le bassin du ruisseau de Pailhe, si une importante partie du flux

d'eau souterraine doit être dirigé vers le Hoyoux, une autre partie est sans doute aussi dirigée vers le sud-ouest et le bassin du Bocq. Dans la partie est du bassin du Hoyoux (structure brachysynclinale), les crêtes de partage hydrographiques des bassins ne correspondent pas à des crêtes de partage hydrogéologiques (fluctuant avec la piézométrie). Au nord-est du bassin du Torrent de Bonne, deux minces synclinaux s'étirant au nord-est (partiellement en dehors de la carte Modave-Clavier) sont connectés au Synclinal de Modave et l'eau souterraine qu'ils contiennent s'écoule vers le sud-ouest. Un flux d'eau souterrain traverse également la limite hydrographique ouest du bassin du Torrent de Bonne, par où une partie des eaux souterraines quittent le bassin pour rejoindre, *in fine*, le Hoyoux (exutoire de la nappe). Au sud-est du bassin du Hoyoux, l'entité de Modave jouxte l'entité de Clavier (Figure IV.2). Cependant les nappes logées dans les formations calcaires ne communiquent pas. L'anticlinal gréseux constitue une limite hydrogéologique. Et même là où la coalescence du Tournaisien inférieur est observée en surface, l'anticlinal gréseux est sub-affleurant et ne permet aucun échange d'eau souterraine entre les deux parties (Brouyère et al, 2009).

Fluctuations piézométriques des nappes

Tant sur le versant est que sur le versant ouest du bassin du Hoyoux, les niveaux d'eau de plusieurs puits ou piézomètres sont (ou ont été) régulièrement mesurés. Quelques chroniques piézométriques sont présentées ci-dessous. Elles concernent essentiellement l'aquifère des calcaires du Carbonifère.

Situés dans la partie est de l'entité de Modave (rive droite du Hoyoux), les puits PP5-Linchet, PP1-Clavier, PP2-Modave et PP3-Modave sont visités mensuellement depuis 1963 par VIVAQUA pour y effectuer une mesure de la profondeur de la nappe. Le forage F6-Tinlot appartient au réseau de surveillance de l'état quantitatif mis en place par la Direction des Eaux Souterraines (SPW-DGO3). Le niveau piézométrique y est mesuré depuis janvier 2009 et relevé de manière automatique au pas de temps horaire depuis octobre 2010. Les courbes montrent que les fluctuations piézométriques de l'ensemble des puits implantés dans les calcaires sont synchrones (Figures IV.11 & IV.12). Des fluctuations annuelles et pluriannuelles sont observées. Le niveau d'eau dans la nappe augmente continûment en hiver sous l'effet de la recharge puis diminue jusqu'à l'hiver suivant. Ainsi, les périodes de basses eaux sont observées en automne, les hautes eaux au printemps. L'amplitude des fluctuations piézométriques varie selon la position du puits au sein du bassin hydrogéologique. Ainsi, PP5-Linchet montre des variations piézométriques de plus grande amplitude que PP2-Modave, respectivement 5 à 8 m (max 14 m) et 2 à 3 m (max 7 m). Outre ces fluctuations saisonnières, des fluctuations pluriannuelles peuvent être distinguées (cycle de 3 à 4 ans), avec des années de hautes eaux (de 1981 à 1985 par exemple) et des années de basses eaux (de 1991 à 1993 ou de 2005 à 2008).

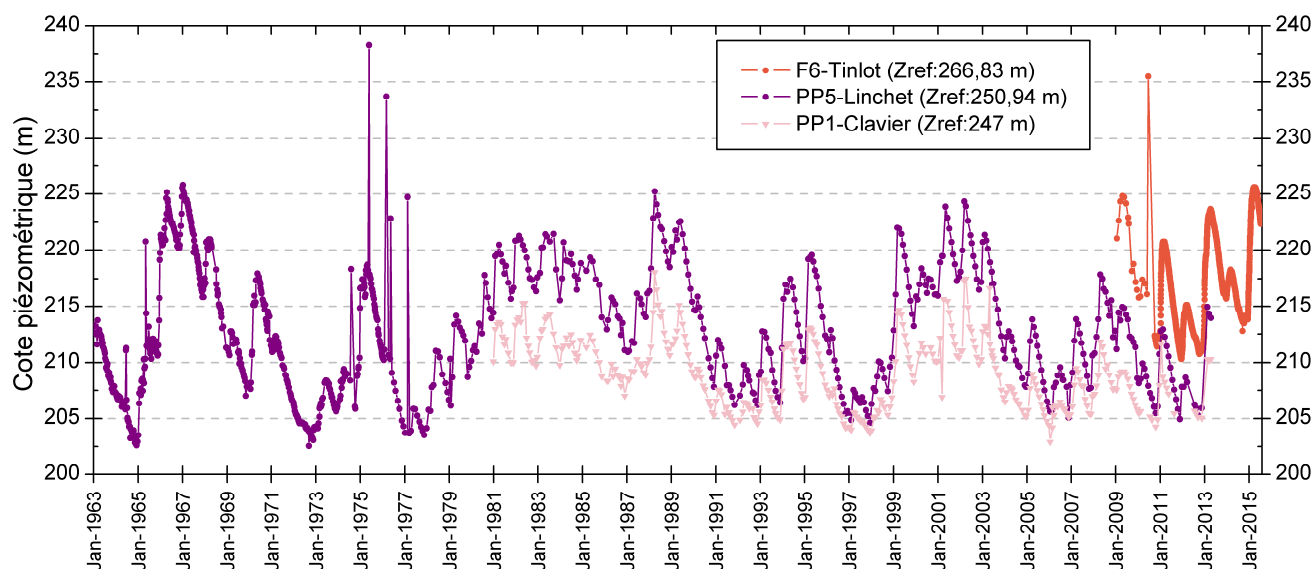


Figure IV.11: Fluctuations piézométriques de la nappe des calcaires du Carbonifère – Entité de Modave (partie est)

La mise en parallèle des courbes piézométriques des puits de Modave, PP2 et PP3, apporte quelques enseignements précieux sur le contexte hydrogéologique (Figure IV.12). Le puits PP3 est implanté dans l'aquiclude à niveaux aquifères du Houiller, tandis que PP2 sollicite l'aquifère des calcaires du Carbonifère. Distants d'environ 500 m, ils sont tous les deux situés dans le bassin du Torrent de Bonne. La nappe logée dans le Houiller fluctue très rapidement de manière saisonnière avec une amplitude de l'ordre de 10 m. Contrairement, à la nappe des calcaires, aucune fluctuation pluriannuelle n'est clairement observée. L'examen de la piézométrie en période de hautes eaux renseigne sur le comportement de la nappe du Houiller. En effet, le niveau piézométrique, en période de hautes eaux, mesuré en PP3 (Houiller) est plus haut que celui en PP2 (calcaires carbonifères). Ceci indique que la nappe logée dans les terrains schisto-gréseux du Houiller est perchée et peut alimenter par débordement l'aquifère calcaire. Au début de l'hiver, la nappe du Houiller réagit rapidement à la recharge. Le niveau piézométrique augmente rapidement. Ensuite, alors que la recharge est constante, le niveau piézométrique se stabilise, contrairement à ce qui est observé dans la nappe des calcaires (augmentation piézométrique graduelle). *Ceci peut s'expliquer par le débordement de la nappe du Houiller qui alimente la nappe des calcaires du Carbonifère en période de hautes eaux. Le trop-plein de la nappe du Houiller est évacué et le niveau piézométrique ne monte plus* (Brouyère et al, 2009).

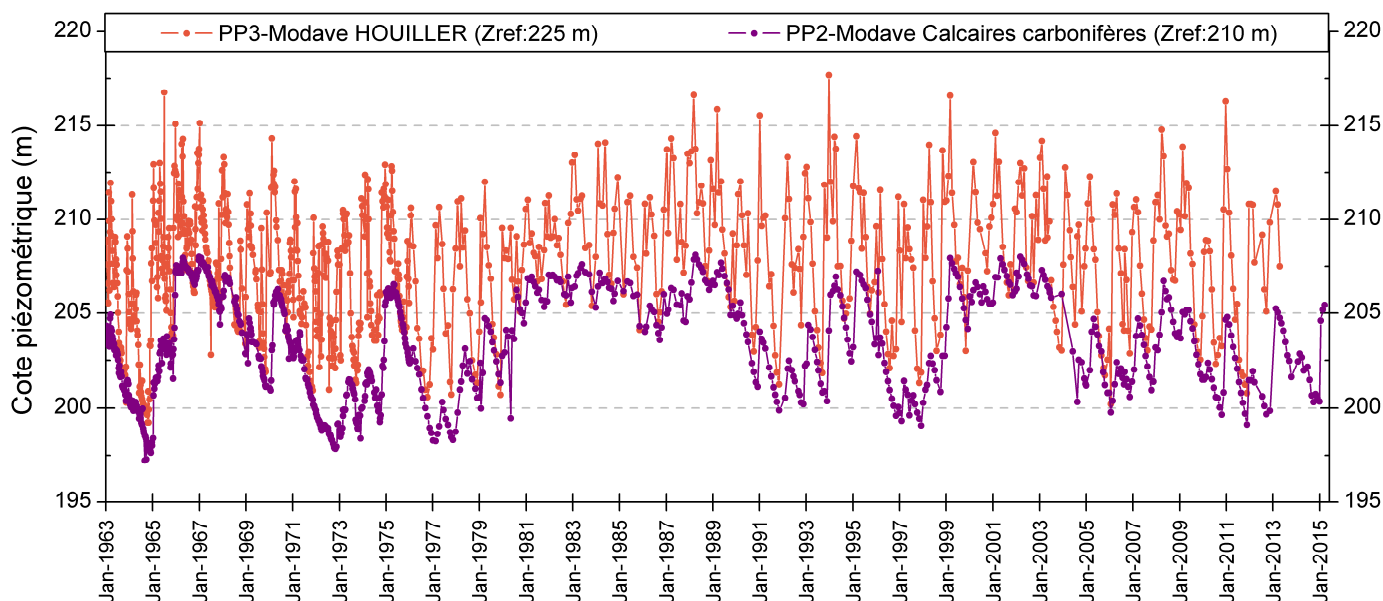


Figure IV.12: Comparaison des fluctuations piézométriques de la nappe des calcaires du Carbonifère et de la nappe du Houiller – Entité de Modave (partie est)

Dans la partie ouest de l'entité de Modave, là où les différentes nappes calcaires sont individualisées suivant la structure géologique en trois synclinaux (Figures IV.2 & IV.10), des données piézométriques ont également été récoltées. Au droit du synclinal de Pailhe, dans le puits PP4, VIVAQUA mesure la cote de la nappe mensuellement (Figure IV.13). Ce puits, implanté en rive gauche du ruisseau de Pailhe, est moyennement profond (≈ 20 m). Le puits est régulièrement tari. Cependant, les courbes montrent que les fluctuations piézométriques mesurées sont assez similaires à celles observées dans la zone de Modave, avec des fluctuations annuelles et pluriannuelles. Les variations piézométriques annuelles sont de l'ordre de 2 à 4 m. Toutefois, ces variations se produisent avec un retard considérable par rapport à la recharge. Quel que soit le niveau de la nappe, le ruisseau de Pailhe reste perché. La cote de son lit est aux alentours de 200 m, celle de la nappe en périodes de hautes eaux atteint, au maximum, 199 m.

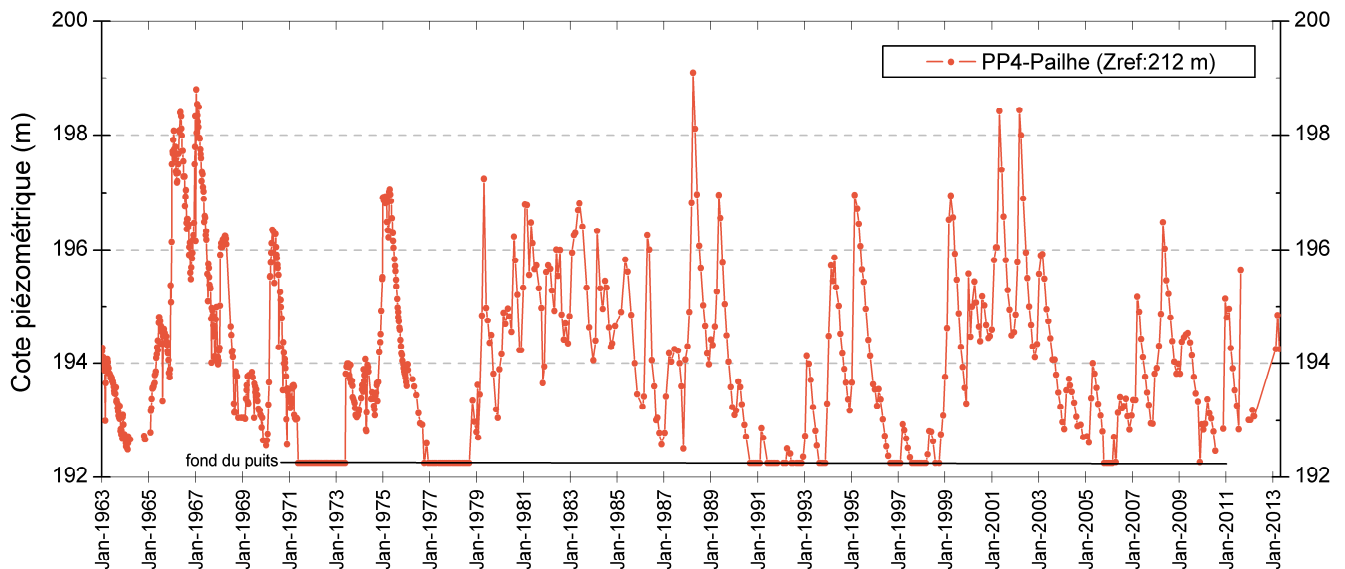


Figure IV.13: Fluctuations piézométriques de la nappe des calcaires du Carbonifère – Entité de Modave (partie ouest) – Synclinal de Pailhe

Au sud, le synclinal calcaire de Petit-Modave est localisé au droit de la vallée sèche du ruisseau Saint-Lambert, indiquant la présence probable d'un aquifère fortement fissuré ou karstifié (Figure IV.2). A l'exception de la perte d'Havelange, peu de phénomènes karstiques visibles ont été identifiés. En aval de ce chanoir, dans le fond du vallon sec, plusieurs affaissements ont été comblés (CWE PSS, 2015). Les quelques données piézométriques disponibles indiquent que le niveau d'eau dans l'aquifère gréseux du Famennien est supérieur au niveau piézométrique de l'aquifère des calcaires carbonifères. La direction de l'écoulement souterrain se fait vers le Hoyoux, exutoire de la nappe.

Dans la zone d'Havelange, le synclinal des Avins clôture la succession des trois synclinaux calcaires de l'entité de Modave en rive gauche du Hoyoux (Figures IV.2 & IV.10). Comme le précédent, ce synclinal est caractérisé par une vallée sèche au droit des formations calcaires. Les écoulements souterrains sont dirigés vers le Hoyoux, exutoire naturel de la nappe. Autour des captages de la CIESAC, implantés le long du Hoyoux, plusieurs piézomètres ont été forés (Figure IV.10). A l'extrémité nord-est du synclinal, sur le site 'La Vanne' on compte sept piézomètres, répartis autour de la galerie. Le niveau d'eau dans ces ouvrages a été suivi et mis en parallèle avec l'eau utile (Figure IV.14). Le piézomètre Pz2, distant de 90 m du captage, présente des fluctuations piézométriques annuelles très faibles (1,5 m maximum). Au Pz4, situé à environ 450 m de la galerie, la variation annuelle du niveau piézométrique peut atteindre 5 m. L'influence du captage provoque un léger rabattement de la nappe et tamponne l'effet de la recharge en lissant les variations du niveau piézométrique (Brouyère et al, 2009). Le piézomètre Pz7, situé à 550 m en amont du captage mais proche du Hoyoux, présente un comportement similaire, avec une amplitude piézométrique de 2 m. Ici, c'est la rivière qui tamponne les fluctuations piézométriques. Dans cette zone, l'eau souterraine s'écoule donc vers le Hoyoux ou converge vers le captage.

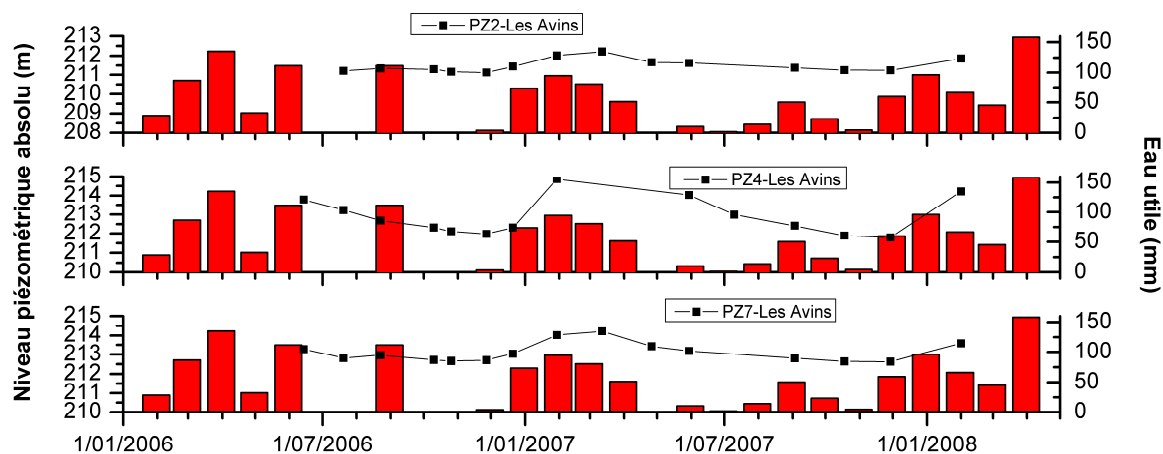


Figure IV.14: Mise en relation de la variation piézométrique avec l'eau utile mensuelle calculée pour les piézomètres Pz2, Pz4, Pz7 – Les Avins (Site 'La Vanne')(Brouyère et al, 2009)

En remontant vers l'amont, on arrive à la source 'Pré à la Fontaine – Petit-Avin', comptant cinq piézomètres. Ils présentent un comportement piézométrique identique, avec une réaction rapide à la recharge (Figure IV.15). A nouveau, on constate que l'amplitude des variations piézométriques est fonction de l'éloignement du forage par rapport à l'exutoire de la nappe. Ainsi, avec une distance décroissante au captage (Pz1, Pz4 & Pz2), l'amplitude des variations piézométriques annuellement passe de 1,5 m à moins de 50 cm (Brouyère et al, 2009).

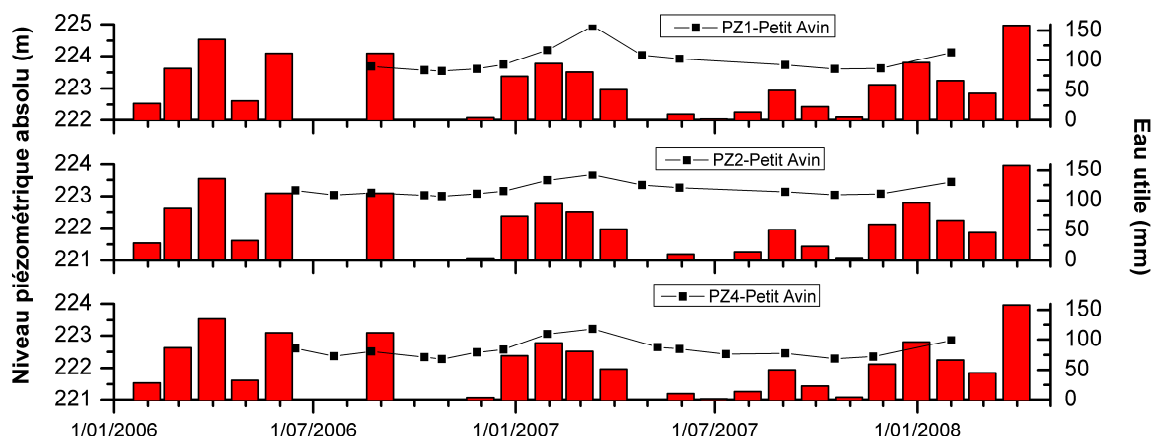


Figure IV.15: Mise en relation de la variation piézométrique avec l'eau utile mensuelle calculée pour les piézomètres Pz1, Pz2, Pz4 – Petit-Avin (Site 'Pré à la Fontaine')(Brouyère et al, 2009)

A l'ouest du Hoyoux, au sein du synclinal des Avins, deux piézomètres ont été implantés en octobre 2013 (Brouyère et al, 2015a). La profondeur de deux forages, F6 et F7, est, respectivement, de 21 m et 18 m. Depuis juin 2014, leur niveau piézométrique est suivi, via un capteur de pression hydrostatique, avec un pas de temps horaire (Figure IV.16). Les courbes montrent des fluctuations piézométriques relativement synchrones mais avec des amplitudes différentes. Le forage F6, situé plus loin de l'exutoire de la nappe, à environ 900 m du Hoyoux, réagit davantage à la recharge, tandis que le niveau d'eau observé au forage F7, distant d'environ 450 m de la rivière, est plus lissé. On remarque, néanmoins, une nette augmentation du niveau piézométrique de la nappe des calcaires en décembre, marquant le début de la période des hautes eaux.

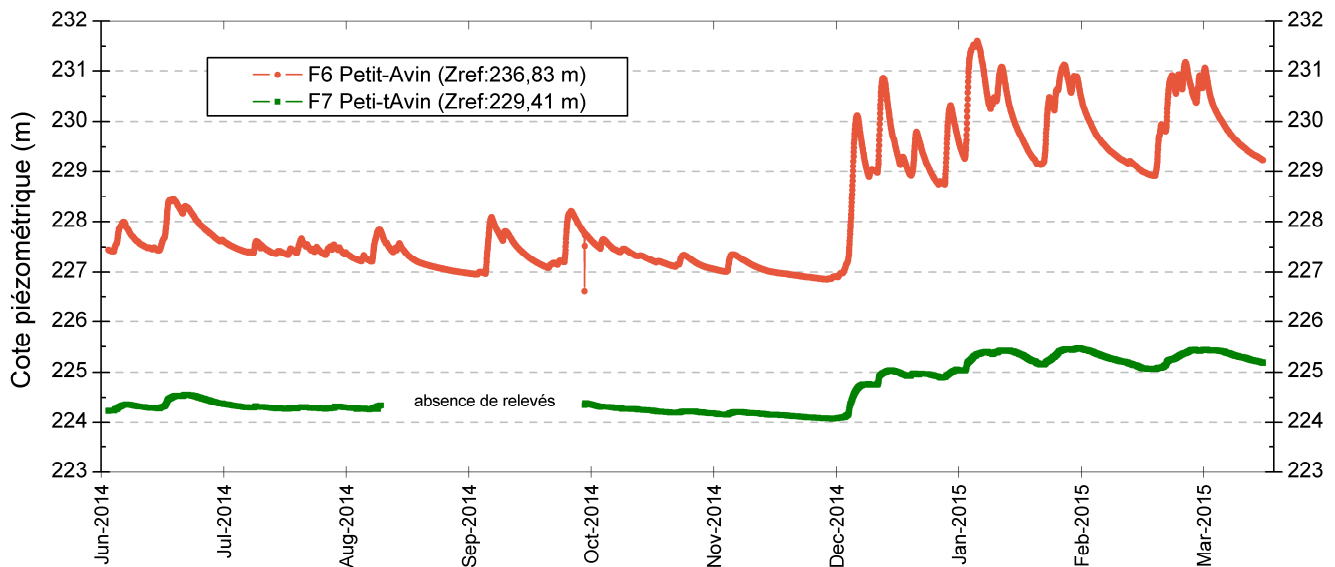


Figure IV.16: Fluctuations piézométriques de la nappe des calcaires du Carbonifère – Entité de Modave (partie ouest) – Synclinal des Avins

Sur la carte Modave-Clavier, *l'aquifère des grès du Famennien* est très peu sollicité. Peu de puits y sont recensés. Un seul site de captage public y prélève de l'eau. Les puits de Bois de Bassin sont situés sur la crête anticlinale entre les synclinaux de Petit-Modave et des Avins (Figure IV.10). Ils appartiennent à l'AIEC. Profonds, respectivement de 75,3 et 101 m, les puits P1 et P2 sont forés dans la Formation de Ciney (anciennement Fa2b), composée de grès et localement de calcaires et de dolomies (Lafleur, 1997). Lors des essais de pompage (été 1997), l'eau dans ces puits était à une profondeur de l'ordre de 24 à 26 m, soit un niveau piézométrique statique aux environs de 268-270 m (LGIH, 1997a). Nous ne disposons pas de données plus récentes. De plus, aucun piézomètre n'ayant été foré lors de l'étude des zones de prévention, aucune chronique piézométrique n'est disponible.

Les quelques relevés ponctuels du niveau piézométrique mesurés dans les ouvrages implantés dans les grès du Famennien indiquent que la nappe des grès est en position haute par rapport à la nappe des calcaires. Quelques cotes piézométriques sont reportées sur la figure IV.10 et sur la carte principale du poster.

IV.2.4. Entité de Clavier

Occupant environ 40 % de la superficie de la carte, sur une bande large de 10 km et orientée sud-ouest / nord-est, l'entité de Clavier est traversée par la ligne de partage des eaux entre le bassin du Hoyoux, à l'ouest, et le bassin de l'Ourthe, à l'est (Figure IV.17). Sur la carte Modave-Clavier, ce dernier bassin comprend le bassin du Néblon et la tête du bassin d'Anthisnes au nord-est. Les principales localités situées dans cette entité sont Clavier, Bois-et-Borsu, Ocquier, Bende et Warzée.

Cette entité est constituée de terrains s'étageant du Famennien au Houiller, selon des plis parallèles affectés de plis transverses engendrant des doubles ennoyages. Cette structure complexe est formée de plusieurs synclinaux calcaires carbonifères, certains à cœur houiller.

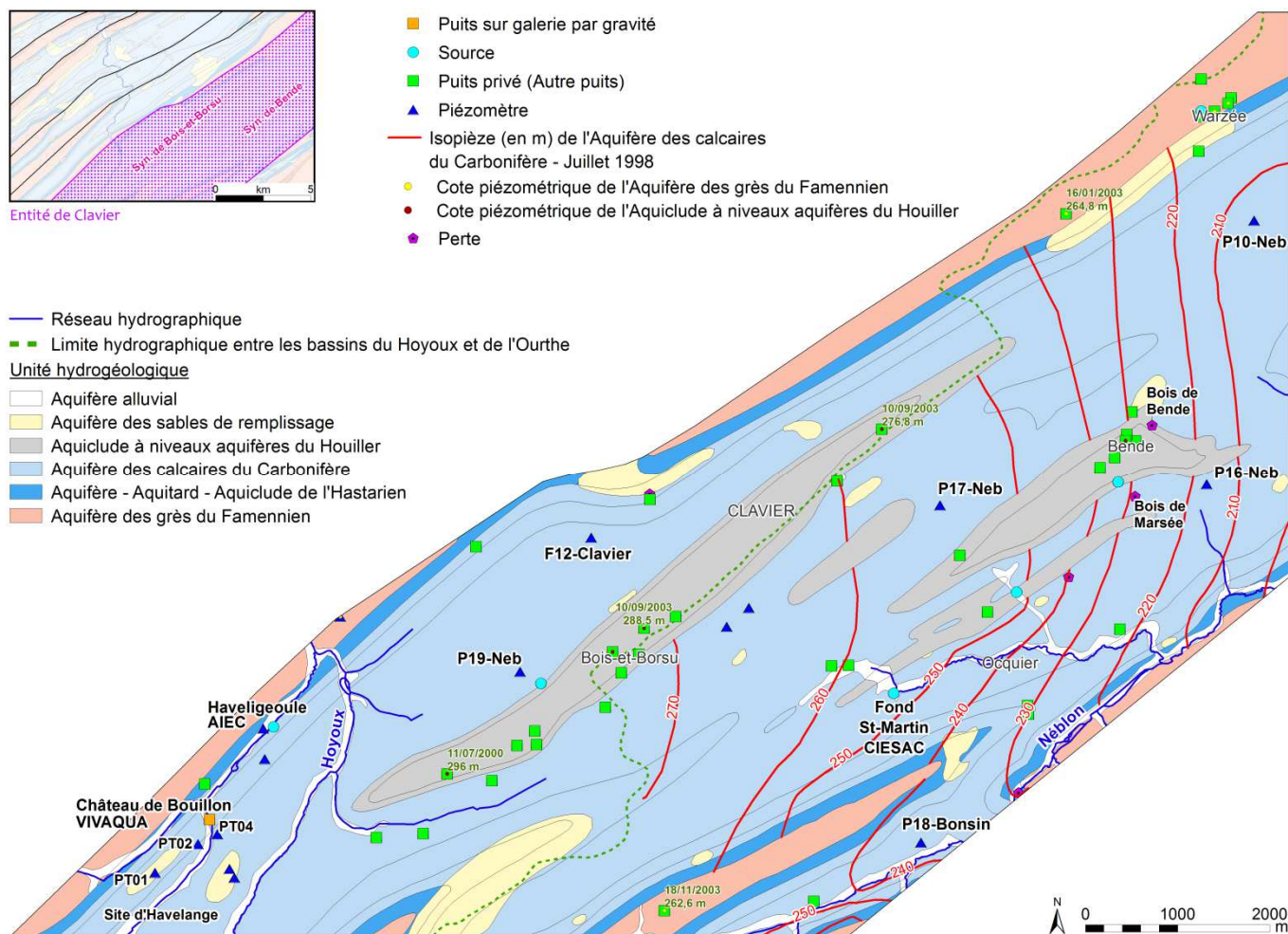


Figure IV.17: Entité hydrogéologique de Clavier - Carte Modave-Clavier

Les eaux souterraines logées dans les calcaires carbonifères de l'entité de Clavier sont sollicitées par de nombreux captages. Parmi les prises d'eau destinées à la distribution publique, se trouvent, d'ouest en est:

Dans le bassin du Hoyoux,

- le captage 'Château de Bouillon' (VIVAQUA): galerie drainante d'environ 91 m de long. Les eaux prélevées sont refoulées vers le captage de la Roche aux Corbeaux à Modave afin d'être envoyées vers Bruxelles et sa région.
- le captage d'Haveligeoule' (AIEC): prise d'eau composée d'une source à l'émergence et d'un drain secondaire. Les eaux sont rassemblées dans la même station de pompage d'où elles sont envoyées vers les réservoirs de Miécrot et d'Havelange pour l'approvisionnement des populations locales.

Dans le bassin du Néblon,

- le captage de Fond-Saint-Martin (CIESAC): source à l'émergence dont les eaux sont acheminées vers la station d'Ocquier.
- le captage du Néblon (CILE): bien que situé en dehors du territoire de la carte étudiée, la zone d'alimentation des galeries du Néblon dont la longueur totale est d'environ 600 m, est essentiellement située sur la carte Modave-Clavier.

Écoulement des eaux souterraines: allure piézométrique de la nappe et interactions avec les eaux de surface.

Dans la vallée du ruisseau de Neuf Moulin, affluent de rive gauche du Hoyoux, quelques piézomètres ont été forés lors de l'étude de l'établissement des zones de prévention autour des captages d'Havelange (CIBE-AIEC, 2006). Le niveau piézométrique y a été relevé, indiquant que les eaux souterraines s'écoulent vers le nord-est, en direction du Hoyoux (exutoire naturel de la nappe) et vers les prises d'eau gravitaires. Ces mesures montrent aussi que le Hoyoux amont et le ruisseau de Neuf Moulin sont perdants. Cette observation est plus nuancée sur un tronçon du Neuf Moulin s'écoulant sur l'unité hydrogéologique de l'Hastarien. Celui-ci s'avère être en pseudo-équilibre avec la nappe, dû à la présence du captage par gravité implanté dans les formations du Tournaisien inférieur. Cette prise d'eau d'Haveligeoule rabat la nappe aux alentours jusqu'à un niveau piézométrique proche de celui du ruisseau (Brouyère et al, 2009).

Rappelons que la partie de la nappe logée au sein de l'entité de Clavier ne communique pas avec la partie de la nappe de la structure brachysynclinale de l'entité de Modave (Brouyère et al, 2009).

Dans le bassin du Néblon, une vaste campagne de terrain menée lors de l'été 1998 a permis de collecter suffisamment de données pour tracer une esquisse de carte piézométrique de l'aquifère des calcaires du Carbonifère (Figure IV.17 & carte principale du poster). Les eaux souterraines s'écoulent vers l'est, avec un rabattement plus prononcé au droit de la vallée du Néblon. L'exutoire de la nappe est constitué du Néblon et des galeries captantes de la CILE qui interceptent l'eau souterraine avant sa sortie vers la rivière. Sur cette carte piézométrique, le caractère drainant du Néblon se marque plus que celui du ruisseau d'Ocquier. Le Néblon est alimenté tout au long de son parcours par des apports diffus provenant de la masse de calcaires carbonifères constituant le flanc nord du bassin. Un profil physico-chimique du Néblon réalisé en 2003 confirme ce phénomène (Popescu et al, 2004). Sur base de calculs de bilans et d'analyses piézométriques, la crête de partage des eaux souterraines entre les bassins du Hoyoux et du Néblon varie dans le temps et ne correspond pas forcément à la limite hydrographique (LGIH, 1995 a & b). Cette observation est confirmée par l'étude de caractérisation de la masse d'eau souterraine RWM021 (Brouyère et al, 2009). Les limites hydrogéologiques de l'aquifère du Néblon correspondent a priori aux limites hydrographiques, excepté dans la partie ouest où un transfert d'eau souterraine semble avoir lieu en provenance de l'extrémité amont du bassin du Hoyoux et via les synclinaux calcaires. Entre les sous-bassins des différents ruisseaux du bassin du Néblon, les limites hydrogéologiques sont quasi inexistantes. Les bilans hydrologiques globaux, à l'échelle du bassin du Néblon, tendent à

indiquer que les échanges d'eau vers les bassins adjacents via l'écoulement souterrain sont faibles. Toutefois, de tels écoulements peuvent avoir lieu et ne pas être détectés dans le bilan, si les flux sortants compensent les flux entrants. Par contre des flux entre les sous-bassins sont très probables, vu les bilans déficitaires calculés. Ils ont lieu au travers de l'aquifère du synclinal calcaire d'Ocquier en direction du Néblon (Brouyère et al, 2009).

Située au sud du village de Bende, dans le fond du bois, la perte du Bois de Marsée se trouve au droit des calcaires du Viséen, mais est alimentée par des eaux provenant du Houiller (Figure IV.17). En 1993, en période de crue hivernale, un essai de traçage y a été réalisé (Meus, 1993). Cet essai a confirmé l'existence d'un axe de circulation karstique au sein du synclinal calcaire entre la perte et la zone des galeries de la CILE, le long du Néblon. Un essai de traçage a également eu lieu depuis la perte diffuse de Bende dans le but de vérifier la liaison toujours avec ces galeries (Brouyère et al, 2009). Aucune restitution du traceur n'a pu être détectée, soit parce que les points d'injection et de restitution ne sont pas hydrogéologiquement connectés (mais ceci est peu vraisemblable), soit à cause d'une grande dilution du traceur au vu des débits importants de ce captage.

Fluctuations piézométriques des nappes

Dans la partie ouest de l'entité de Clavier, en rive gauche du Hoyoux, aux alentours des captages "Château de Bouillon" et "Haveligeoule" (vallée du Neuf Moulin), plusieurs piézomètres ont été forés dans les calcaires carbonifères (Figure IV.17). Leur profondeur est comprise entre 10 et 44 m (CIBE-AIEC, 2006). Au droit de 4 ouvrages, le niveau piézométrique est suivi mensuellement, voire hebdomadairement entre 2006 et 2008 (Figure IV.18). Les fluctuations piézométriques sont synchrones. La période des hautes eaux a lieu à la fin de l'hiver (début du printemps), les basses eaux en automne. La nappe réagit rapidement à la recharge, traduisant un transfert rapide de l'eau à partir de la surface jusqu'à la nappe. Le niveau piézométrique fluctue annuellement de 1 m à 1,5 m aux PT02 et PT04, et de 2 à 4 m aux PT01 et PT05. L'amplitude de ces fluctuations décroît proportionnellement à la distance au captage, ce dernier lissant ces fluctuations par effet tampon. Notons que le ruisseau de Neuf Moulin est perdant dans cette zone.

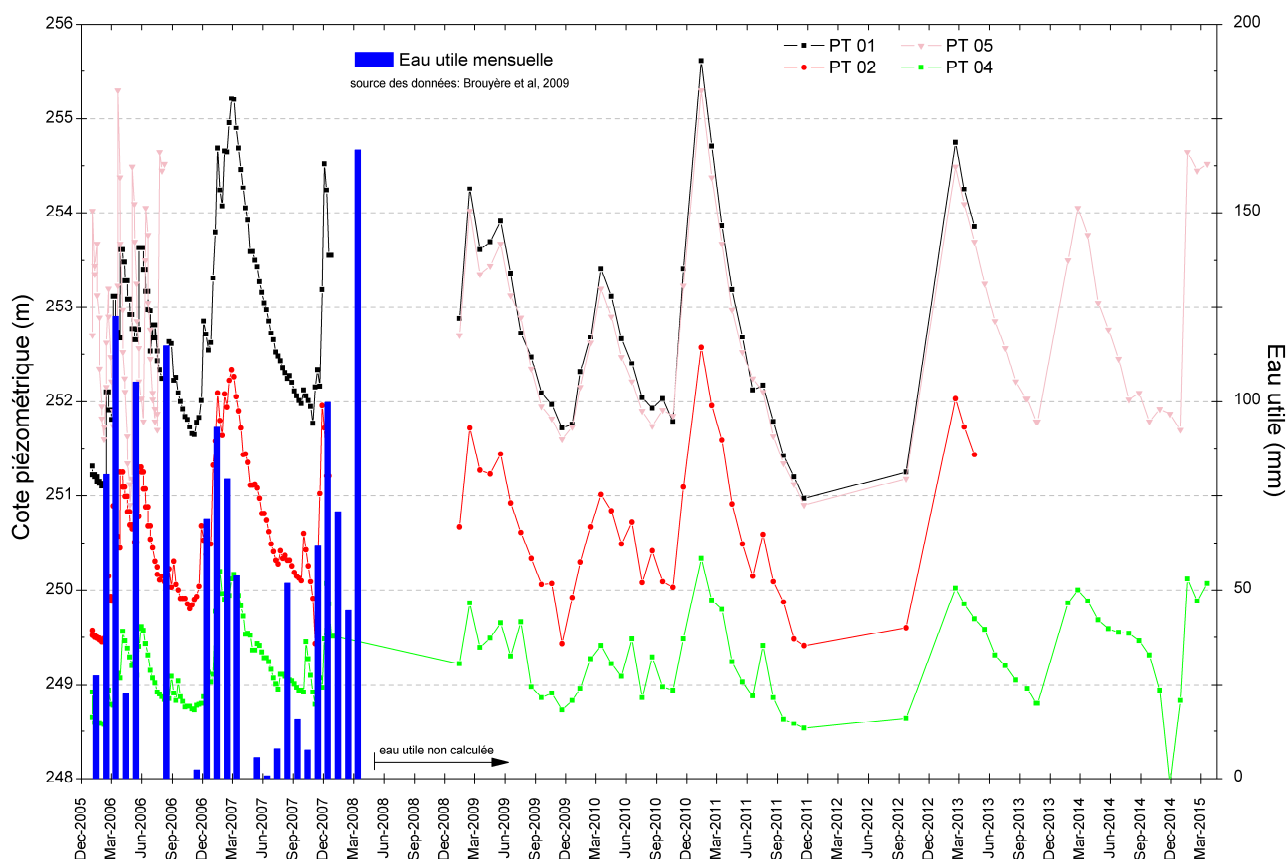


Figure IV.18: Mise en relation de la variation piézométrique avec l'eau utile mensuelle calculée pour les piézomètres PT01-02-04-05 Havelange (bassin du Hoyoux) – Entité de Clavier

Sur le versant est du Hoyoux, deux piézomètres sont aussi suivis régulièrement (Figure IV.17). Les piézomètres P19-Neb et F12-Clavier sont implantés dans l'aquifère des calcaires du Carbonifère. Sur les courbes de la figure IV.19, une cyclicité saisonnière se marque, avec des périodes de hautes eaux et de basses eaux. Des fluctuations pluriannuelles semblent aussi se dessiner sur la chronique du puits F12-Clavier, où une année sur deux, le niveau piézométrique général est plus bas. Cette observation est à confirmer dans le temps avec un historique de mesures plus long. Les amplitudes annuelles des fluctuations piézométriques sont importantes, de 5 à 10 m pour F12-Clavier et de 15 à 25 m pour P19-Neb. Ces valeurs élevées témoignent, qu'à ces endroits, la nappe est éloignée de tout exutoire (pas d'effet tampon) et ainsi que l'eau provenant des précipitations alimente directement l'aquifère (réaction rapide du niveau piézométrique à la recharge).

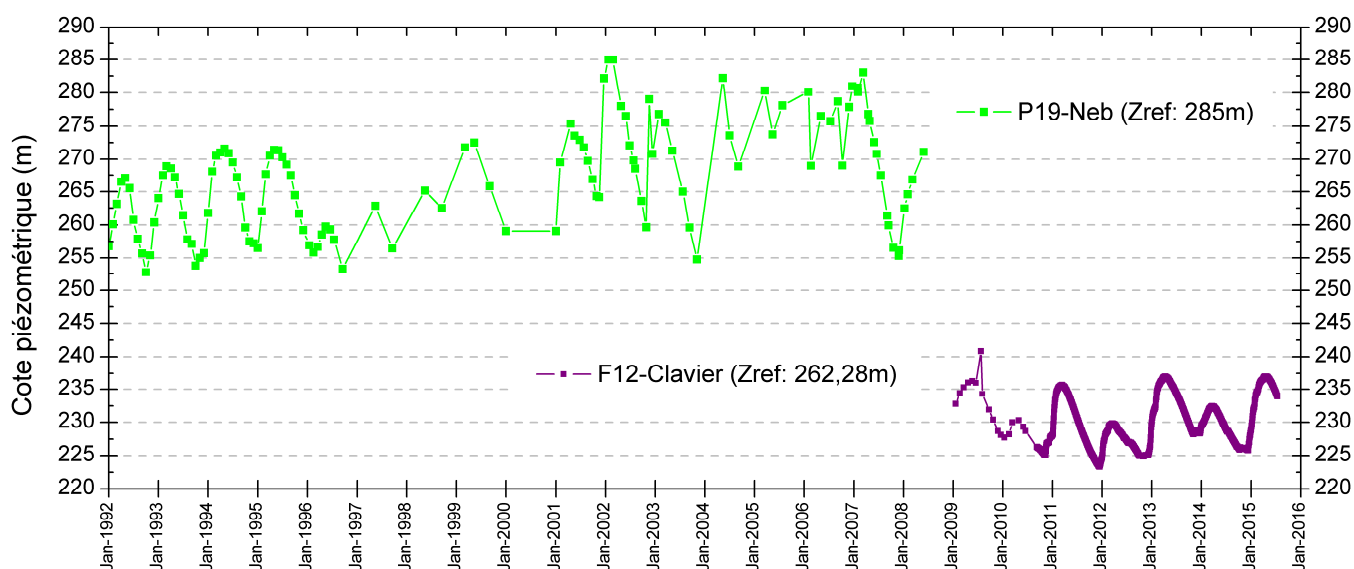


Figure IV.19: Fluctuations piézométriques de la nappe des calcaires du Carbonifère – Entité de Clavier (bassin du Hoyoux: P19-Neb – F12-Clavier)

Vers l'est, dans le bassin hydrographique du Néblon, les piézomètres P10-P16-P17 – Neb, forés dans les calcaires du Carbonifère, se situent également en tête de bassin (Figure IV.17). Ainsi, leur niveau piézométrique présente aussi des variations saisonnières importantes (Figure IV.20). Les amplitudes maximales observées comprises entre 20 et 30 m. Le niveau piézométrique s'élève rapidement suite à la recharge. La décroissance du niveau d'eau est plus lente.

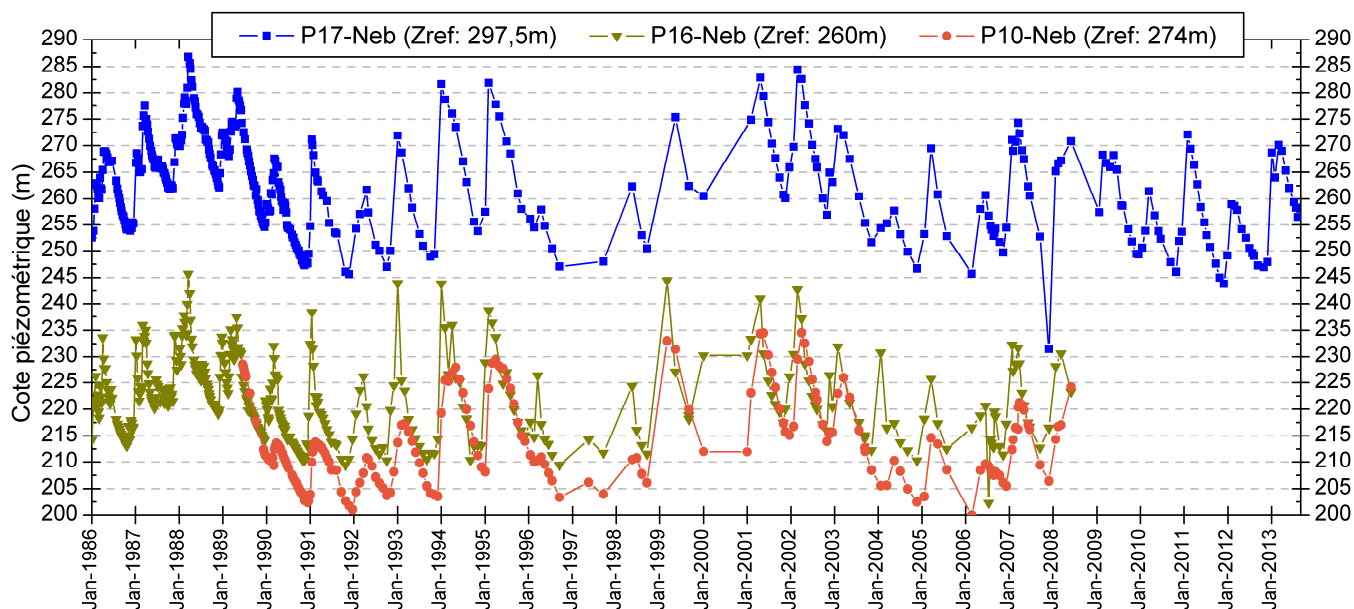


Figure IV.20: Fluctuations piézométriques de la nappe des calcaires du Carbonifère – Entité de Clavier (bassin du Néblon: P10-P16-P17- Neb)

A proximité de ruisseau de Chardeneux, le piézomètre P18-Bonsin est implanté dans l'aquifère des calcaires du Carbonifère (Figure IV.17). L'amplitude des fluctuations des niveaux piézométriques mesurés est d'environ 4 m par an, 6 m maximum (Figure IV.21). Cette faible valeur, en comparaison des piézomètres cités ci-dessus, est due à la position du piézomètre dans le bassin hydrogéologique. Situé à côté du ruisseau, le niveau d'eau dans le puits (et donc

la nappe) s'équilibre avec le niveau d'eau du cours d'eau, exutoire de la nappe. Ainsi les variations piézométriques sont amorties à proximité du ruisseau. Ces chroniques, mises en parallèle avec la quantité d'eau utile mensuelle, indiquent, néanmoins, une réponse rapide de la nappe à la recharge. Les forages F12-Clavier et P18-Bonsin font partie du réseau de surveillance piézométrique du SPW, PIEZ'EAU.

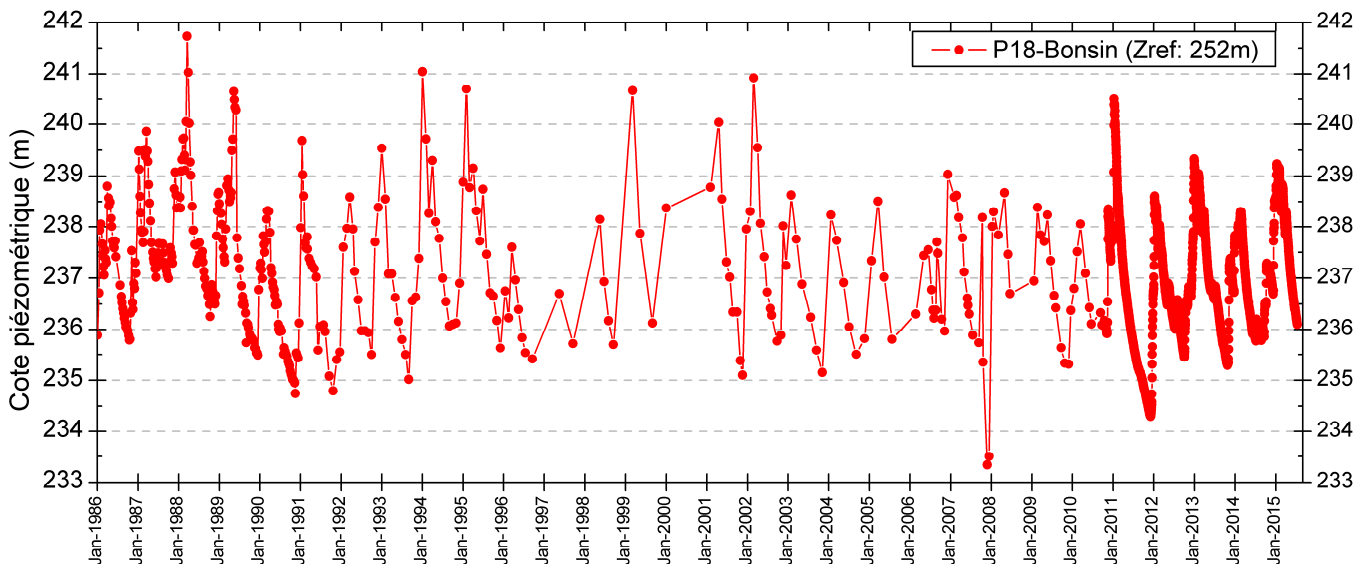


Figure IV.21: Fluctuations piézométriques de la nappe des calcaires du Carbonifère – Entité de Clavier (bassin du Néblon: P18-Bonsin)

Quelques cotes piézométriques ont été mesurées dans des ouvrages implantés dans l'aquiclude à niveaux aquifères du Houiller du synclinal de Bois-et-Borsu, ainsi que dans l'aquifère des grès du Famennien (anticlinaux de Bassine et de Warzée)(Figure IV.17). Ces niveaux piézométriques sont supérieurs à ceux mesurés dans l'aquifère des calcaires. Ces nappes alimentent ainsi la nappe logée dans les calcaires, essentiellement en périodes de hautes eaux. Aucune chronique n'est disponible, permettant de mieux détailler le comportement hydrodynamique des nappes logées dans ce type de terrain.

IV.2.5. La transition Condroz-Famenne

Occupant le coin sud-est de la carte Modave-Clavier, la zone de transition Condroz-Famenne est composée des unités schisto-gréseuses du Dévonien supérieur ainsi que d'un synclinal calcaire du Carbonifère (Figure IV.22). Plusieurs ruisseaux rejoignent le Néblon (bassin de l'Ourthe). Deux villages sont situés dans cette zone, Borlon et Bonsin.

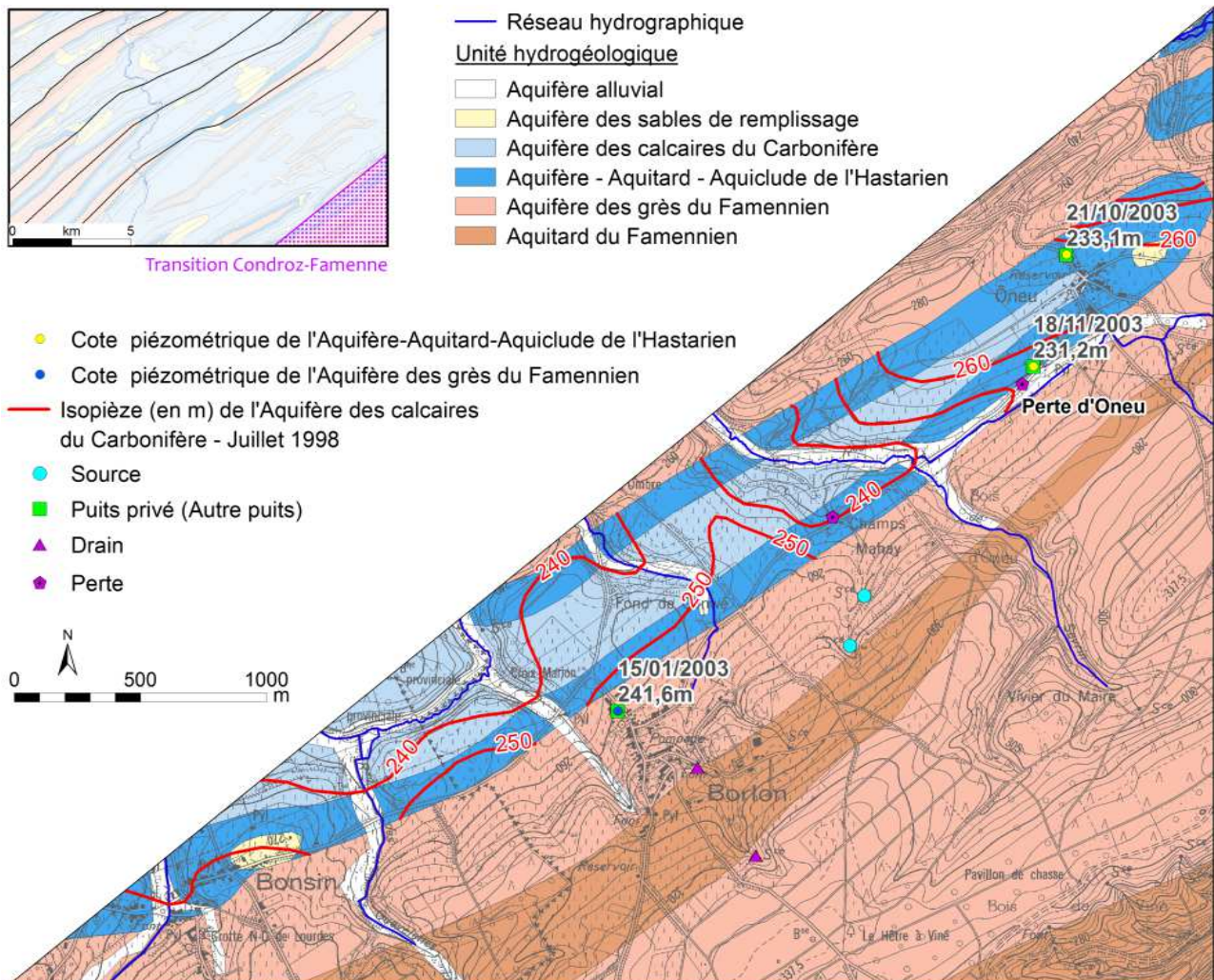


Figure IV.22: Transition Condroz-Famenne - Carte Modave-Clavier

Les eaux souterraines dans cette zone sont peu exploitées. Quelques prises d'eau privées, un ancien captage public sont recensés. Directement au sud, sur la carte Maffe-Grandhan, se situe la galerie 'Bois de Borlon' (SWDE), sollicitant l'aquifère des grès du Famennien.

Les quelques données piézométriques récoltées indiquent, à nouveau, que le niveau d'eau de la nappe des calcaires peut varier fortement et que la nappe des grès alimente celle des calcaires (Figure IV.22). Les ruisseaux sont drainants sur les grès. Dès qu'ils s'écoulent sur les calcaires, ils deviennent généralement perdants. L'écoulement souterrain, dans le synclinal calcaire, est dirigé vers le sud-ouest, suivant l'envoyage. Les ruisseaux traversant le synclinal drainent, en tout ou en partie, la nappe. Une injection de fluorescéine a été réalisée dans la perte d'Oneu (Di Clemente & Laurent, 1986). Les cellules de charbon actif placées dans le ruisseau de Sévrain ont confirmé son caractère drainant.

IV.2.6. Relation entre les eaux souterraines et les eaux de surface & Modélisation hydrogéologique régionale (Projet Synclin'Eau)

Relation entre les eaux souterraines et les eaux de surface

L'étude de la dynamique des échanges entre les eaux souterraines et les eaux de surface présente un intérêt tant d'un point de vue quantitatif que qualitatif, et particulièrement dans le cadre de la gestion intégrée d'un bassin hydrographique. Une typologie mettant en évidence quatre mécanismes d'échanges différents a été développée (Brouyère *et al.*, 2009):

- Système potentiellement drainant: l'aquifère alimente le cours d'eau et contribue à maintenir un "niveau de base". Les eaux souterraines assurent le débit d'étiage. Le débit de la rivière augmente de l'amont vers l'aval, tout au long de la section drainante. La qualité des eaux du cours d'eau est influencée, entre autres, par la qualité des eaux souterraines (par ex., les eaux souterraines stabilisent la température des eaux de surface);
- Système potentiellement perdant: le cours d'eau alimente l'aquifère. Le débit de la rivière peut diminuer suite à l'infiltration d'eau de surface vers la nappe. En période d'étiage, ce débit peut être fortement amoindri, allant jusqu'à l'assèchement du cours d'eau si celui-ci n'est pas suffisamment alimenté par le ruissellement dans la partie amont du bassin. La qualité des eaux souterraines est influencée, entre autres, par la qualité des eaux de surface. Rappelons aussi que la quantité d'eau infiltrée dépend principalement de la conductivité hydraulique des sédiments tapissant le lit de la rivière;
- Système en pseudo-équilibre: les fluctuations de la nappe (hautes eaux – basses eaux) et du ruisseau (crues ou étiages) font en sorte que le sens des échanges peut être variable, de l'aquifère vers le cours d'eau (ESO→ESU) ou du cours d'eau vers la nappe (ESU→ESO);
- Système Perte-Résurgence: dans les zones karstiques, un cours d'eau peut présenter des sections où l'essentiel des écoulements sont souterrains, et d'autres sections où ces écoulements ont lieu à la surface du sol. Les pertes correspondent aux points d'entrée des eaux de surface dans le milieu souterrain et les résurgences correspondent à leur réapparition en surface. Le débit du cours d'eau peut être affecté de manière brutale. Une grande partie ou la totalité du cours d'eau peut s'engouffrer dans ces conduits souterrains.

Pour chacun de ces systèmes, deux états ont été définis: vérifié et extrapolé. Le premier est employé pour les tronçons où des mesures expérimentales ont été réalisées, tels que des jaugeages, des relevés piézométriques, des essais de traçage. En l'absence de telles données, la typologie est basée sur la géologie et sur le contexte local de la dynamique ESO-ESU.

La relation entre les eaux souterraines et les eaux de surface a déjà été abordée dans les sous-chapitres précédents. Dans les lignes qui suivent, cette problématique est abordée à l'échelle de la carte Modave-Clavier pour l'ensemble des cours d'eau (Figure IV.23). Les cours d'eau s'écoulant sur les calcaires du Carbonifère sont généralement perdants, à l'exception des têtes de ruisseaux qui sont drainants. Les ruisseaux prennent leurs sources sur les formations moins

perméables du Dévonien (schistes et grès) où ils sont considérés comme drainants. Ensuite ils se perdent au droit des terrains calcaires. Le Hoyoux dans sa partie méridionale (carte Modave-Clavier) est perdant. Ensuite, le tronçon entre Petit-Avin et Les Avins est en pseudo-équilibre avec la nappe. Après, aussi bien en rive gauche qu'en rive droite, la nappe des calcaires s'écoule souterrainement jusqu'au Hoyoux, qui peut donc être qualifié de drainant. Le Néblon est également alimenté tout au long de son parcours par des apports diffus provenant de la masse de calcaires carbonifères constituant le flanc nord du bassin. Les interactions ESO-ESU ont donc lieu depuis les eaux souterraines vers les eaux de surface. Le Néblon est cependant perdant, voire en pseudo-équilibre lorsqu'il traverse l'aquifère des calcaires du Carbonifère (Viséen). Cette interprétation est soutenue par quelques mesures piézométriques. Le ruisseau d'Ocquier est le seul ruisseau permanent de la rive gauche du Néblon. Il est potentiellement drainant depuis les étangs de Vervoz jusqu'à son exutoire. Le cours amont du ruisseau d'Ocquier est considéré comme perdant car généralement sec (Brouyère et al, 2009).

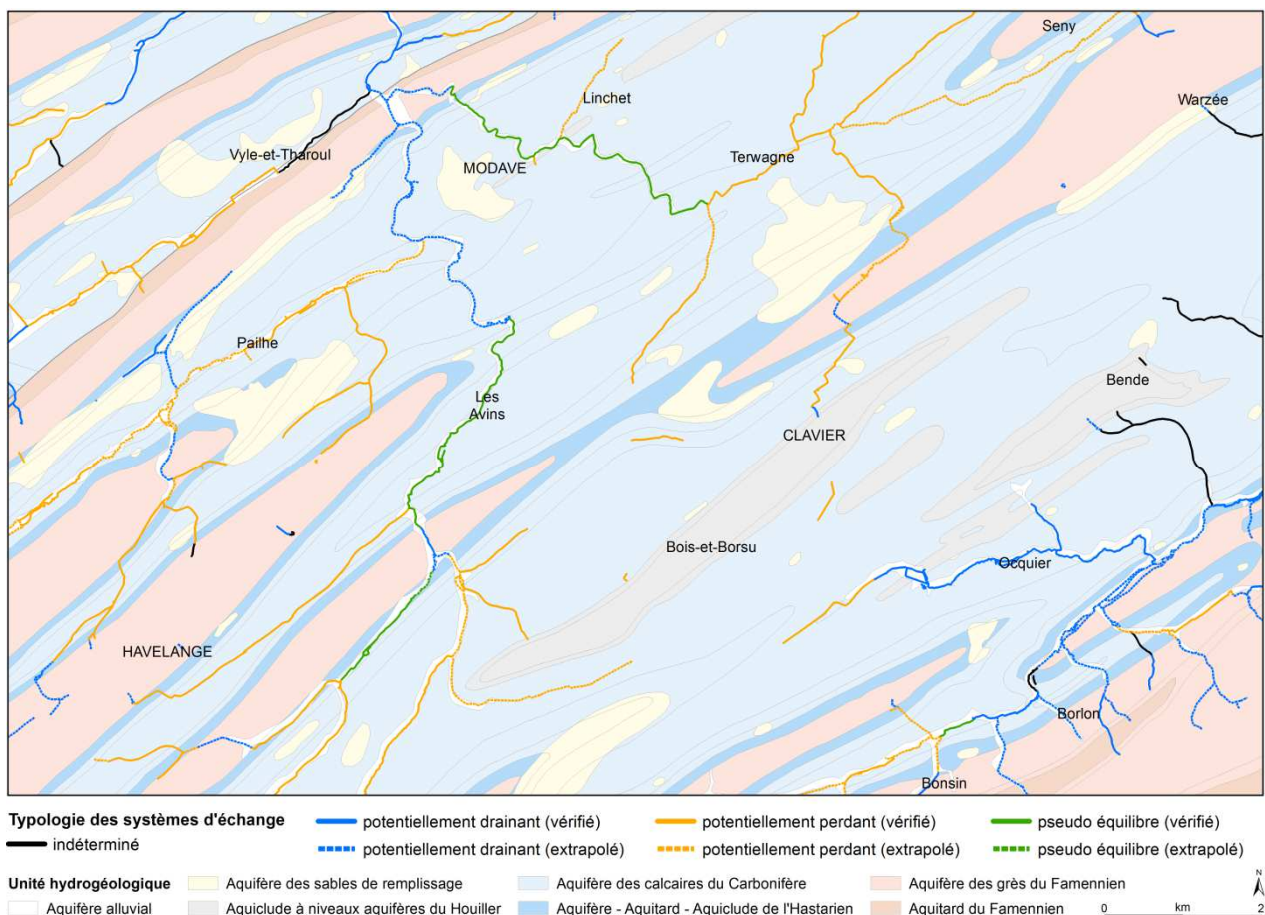


Figure IV.23: Interactions entre eaux de surface et eaux souterraines - MESO RWM021 sur la carte Modave-Clavier (d'après Brouyère et al., 2009)

Modélisation hydrogéologique régionale

La masse d'eau souterraine RWM021 a fait l'objet d'une modélisation à l'échelle régionale sur base des données collectées lors de la phase de caractérisation hydrogéologique du projet "Synclin'Eau" (Leroy et al, 2010). Quelques résultats pertinents sont présentés ci-après. La

figure IV.24 présente la piézométrie calculée, pour l'année 2006, en régime permanent (les sollicitations sont moyennées pour la période choisie). La calibration du modèle est basée sur les hauteurs piézométriques et les débits de base observés au droit de différents points de mesures répartis sur l'ensemble de la masse d'eau. Les résultats de cette modélisation sont à considérer à titre indicatif. En effet, la piézométrie présentée à la figure IV.24 pour l'ensemble du territoire correspondant à la carte est basée sur un calcul réalisé à l'échelle régionale. Elle n'a pu être calée, à plus petite échelle, sur tout le territoire modélisé. Localement, la piézométrie calculée est supérieure à la surface topographique, ce qui montre qu'une échelle beaucoup plus détaillée est nécessaire pour une modélisation physiquement plus significative dans cette zone.

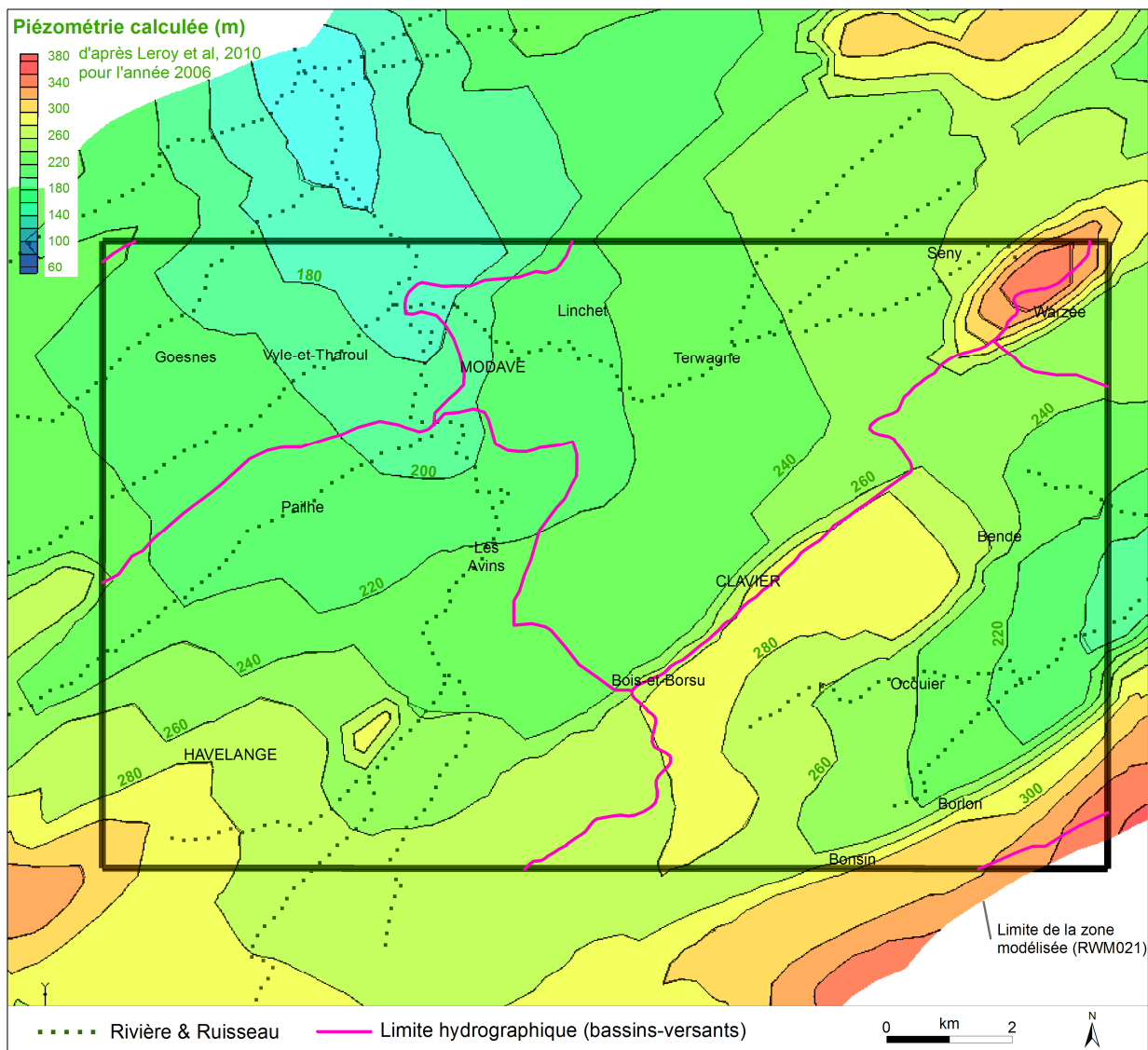


Figure IV.24: Piézométrie calculée (résultats du modèle calibré, à l'échelle régionale, pour l'année 2006, d'après Leroy et al, 2010)

Cette modélisation régionale a cependant permis d'estimer les transferts d'eau souterraine entre bassins hydrographiques, résultats donnés par le modèle calibré, également, sur l'année 2006 (Leroy et al, 2010). Déjà avancée dans l'étude de caractérisation, l'hypothèse de flux d'eau souterraine entre sous-bassins est confirmée par le modèle. Il valide aussi la non-correspondance entre les bassins hydrographiques et les bassins hydrogéologiques au sein des synclinaux calcaires. Les limites des bassins versants recoupent perpendiculairement l'axe

de ces synclinaux. Il faut également noter que la position des crêtes de partage entre bassins hydrogéologiques, au sein d'un même synclinal calcaire, peut varier dans le temps car dépendante des conditions piézométriques. Ainsi, les transferts les plus importants entrant dans le bassin du Hoyoux, en rive droite, se font au niveau des synclinaux de Vyle-et-Tharoul et de Marchin (Triffoy). Des flux entrants sont aussi identifiés, via les synclinaux de Seny et de Fraiture (entité de Modave) vers le bassin du Hoyoux. Par contre, le bassin du Hoyoux est perdant, en rive gauche, via le synclinal de Marchin en direction de la vallée du Samson et, dans sa partie plus en amont, via le synclinal de Pailhe vers le sud de la vallée du Bocq. Il est par contre bénéficiaire vis à vis du Néblon.

La modélisation a aussi complété la cartographie des tronçons perdants et drainants du Hoyoux et de ses affluents, établie dans la phase de caractérisation (Brouyère et al, 2009; Leroy et al, 2010). Ainsi le modèle montre que le Torrent de Bonne, dans sa partie amont, présente un caractère mixte (par moment drainant, par moment perdant). Ensuite, il est perdant au milieu de son parcours et devient nettement drainant dans sa partie aval. Dans la partie amont du bassin du Hoyoux, une zone relativement drainante est mise en évidence (ici, le modèle ne corrobore pas les conclusions de l'étude de caractérisation). Dans la partie aval du bassin, les zones de pertes importantes des affluents du Hoyoux dans les synclinaux de Pailhe et de Marchin sont bien représentées. Selon le modèle, les affluents du Hoyoux s'écoulant dans les synclinaux de Marchin et de Pailhe sont globalement perdants tandis que ceux s'écoulant dans celui de Vyle-et-Tharoul sont globalement drainants. Ces interprétations sont directement liées à la qualité du modèle régionale et de sa calibration. Il convient donc d'en tenir compte lors de l'utilisation de ses résultats dans une étude locale.

IV.2.7. Phénomènes karstiques

Sur la carte Modave-Clavier, une septantaine de phénomènes karstiques, dont certains ont déjà été mentionnés ci-dessus, est recensée au sein des calcaires carbonifères (CWEPS, 1996 & 2015). La majorité d'entre eux est localisée dans le bassin du Hoyoux (Figure IV.25). L'Atlas du Karst indique que le karst est assez actif dans la région. En effet, d'une visite sur le terrain à l'autre, une évolution des sites karstiques est observée tels le recul de chanoir ou l'affaissement de dolines, voire de nouvelles dolines. Ces derniers phénomènes ont souvent lieu en aval de lieux de perte connus, témoignant d'un soutirage souterrain.

Une seule liaison karstique a été validée. En effet, un traçage a permis d'établir la connexion entre la perte du Bois de Marsée et les galeries du Néblon (Meus, 1993). Dans le sud-est de la carte, un traçage a été réalisé depuis la perte d'Oneu. La résurgence de cette perte est située au niveau du ruisseau de Séverin (Di Clemente et Laurent, 1986). D'autres liaisons karstiques sont supposées. Par exemple, dans la vallée du ruisseau de Vyle, plusieurs pertes temporaires impénétrables ont été identifiées. Les eaux ressortent à la résurgence de Vyle en rive gauche du Hoyoux, peut-être liée à la faille de Pont-de-Bonne. Au départ de la zone d'infiltration diffuse de Bende, un essai de traçage a été mené, afin de vérifier la connexion avec les galeries du Néblon (Brouyère et al, 2009). Aucune restitution n'a été observée, sans doute due à la dilution trop importante du traceur pour être détecté par les appareils de mesure.

Quelques dépôts cénozoïques comblant des dépressions affectant les calcaires (paléokarsts) sont les témoins d'une ancienne karstification. D'un point de vue hydrogéologique, ces dépôts sablo-argileux, d'extension limitée et de composition assez hétérogène, ont de faibles capacités aquifères.

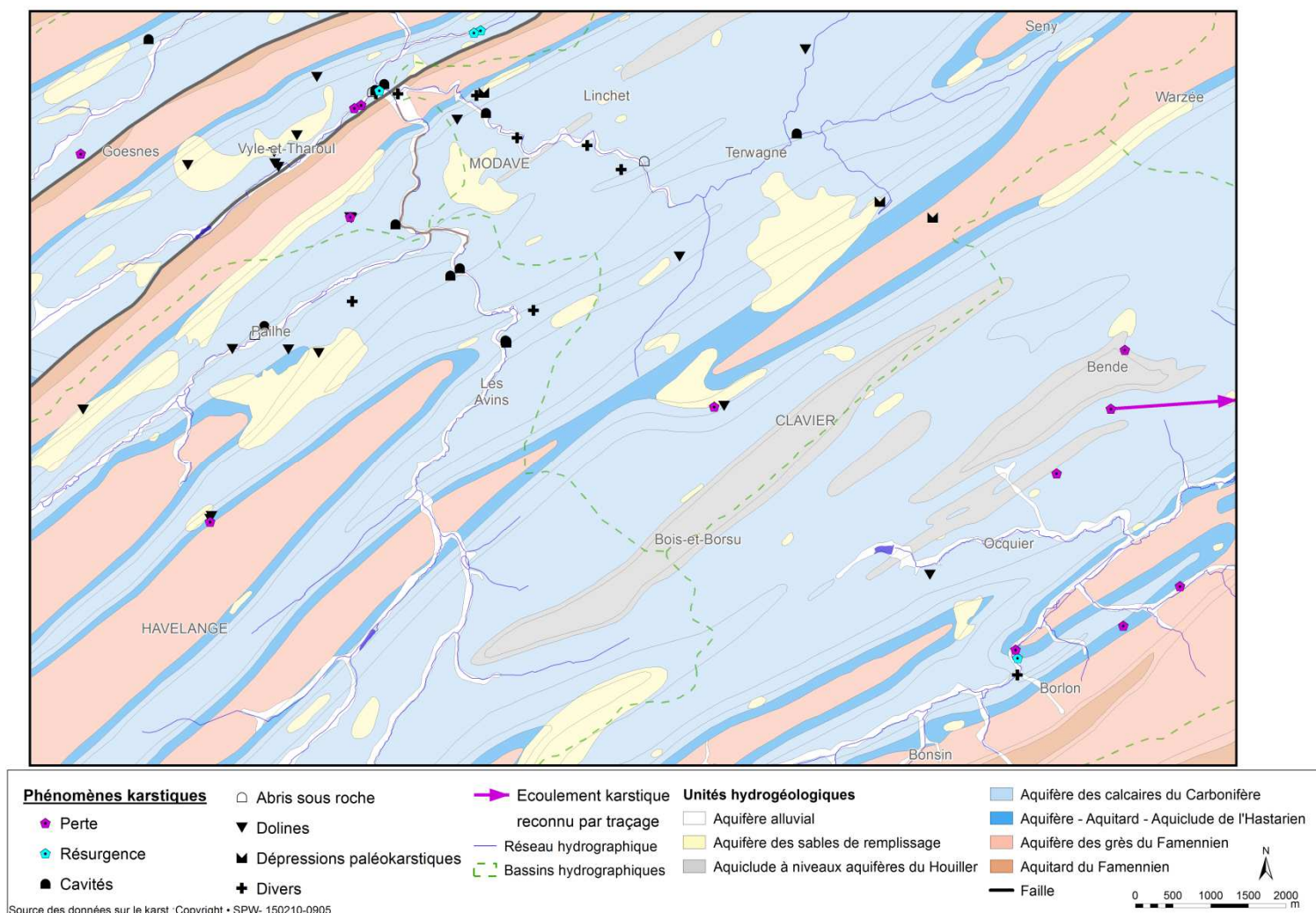


Figure IV.25: Phénomènes karstiques recensés dans la région Modave-Clavier

IV.2.8. Coupes hydrogéologiques

La coupe, orientée approximativement NE-SW, traverse les villages de Jamagne, Vyle-et-Tharoul, Pailhe, Petit-Avin et Odêt. Elle est située essentiellement dans le bassin-versant du Hoyoux, via les ruisseaux du Triffoy, de Vyle, de Pailhe et le Hoyoux. Une petite partie au sud-ouest appartient au bassin-versant du Néblon (bassin de l'Ourthe). La coupe est entièrement située dans le Condroz où la structure 'Synclinal-Anticlinal', typique du Synclinorium de Dinant, est bien visible. Toutes les unités hydrogéologiques du Cénozoïque et du Paléozoïque présentes sur la carte Modave-Clavier sont recoupées par la coupe.

Deux coupes ont été dressées, sur le même axe mais avec une échelle des hauteurs différente. L'échelle horizontale des coupes est au 25 000^{ème}, l'échelle verticale est de 1/25 000 pour la coupe géologique et de 1/5000 pour la coupe hydrogéologique. Ce facteur d'exagération des hauteurs (X5) permet une meilleure visibilité du niveau piézométrique, reporté sur cette coupe.

Cette coupe est basée sur l'ancienne carte géologique de Modave-Clavier (Lohest *et al.*, 1902). Lors de la réalisation de la carte hydrogéologique prototype, en 2000, quelques pendages ont pu être mesurés sur le terrain, sur des affleurements situés dans les carrières, en bordure de cours d'eau, de routes. Quelques niveaux piézométriques, situés à proximité de l'axe de la coupe, y sont reportés, ainsi que le tracé hypothétique de la surface piézométrique au droit de l'entité hydrogéologique de Modave.

Excepté la transition Condroz-Famenne, la coupe traverse toutes entités hydrogéologiques de la carte Modave-Clavier. Du nord au sud, on observe:

- le synclinal faillé de Marchin;
- le synclinal faillé de Vyle-et-Tharoul;
- l'entité de Modave comprenant les synclinaux de Pailhe, de Petit-Modave et des Avins;
- l'entité de Clavier avec le synclinal, à cœur houiller, de Bois-et-Borsu.

Le report sur la coupe des quelques données piézométriques disponibles fournit de précieux enseignements. Les niveaux d'eau mesurés dans les aquifères calcaires sont plus profonds que ceux observés dans les aquifères schisto-gréseux. Ces derniers niveaux piézométriques sont, généralement, très proches de la surface topographique. Dans les puits profonds, cela signifie qu'ils captent, très certainement, la nappe logée dans les horizons profonds fracturés (nappe sous pression). Dans les puits peu profonds, c'est la nappe superficielle logée dans le manteau d'altération qui est captée. Les niveaux d'eau mesurés dans l'aquifère des calcaires du Carbonifère reflètent le caractère plus perméable de cette unité hydrogéologique. Les eaux souterraines sont dirigées vers le cœur des synclinaux calcaires avec la nappe logée dans les aquifères gréseux s'y déversant. Le seuil hydrogéologique au passage de l'aquiclude schisteux du Carbonifère (Formation de Pont d'Arcole), généralement marqué dans la piézométrie, n'est pas visible sur cette coupe par manque de données piézométriques.

Le tracé supposé de la surface piézométrique dans l'entité de Modave reflète la position de la nappe logée dans les calcaires du Carbonifère en octobre 2009. Ces mesures piézométriques (ainsi que l'interprétation cartographique) ont été effectués par GEOLYS dans le cadre de l'étude des zones de prévention des galeries de VIVAQUA à Modave (GEOLYS, 2011). Sur la coupe, la position perchée du ruisseau de Pailhe est clairement démontrée.

Dans le synclinal de Bois-et-Borsu, on constate également que la nappe logée dans les formations schisto-gréseuses du Houiller est perchée par rapport à l'aquifère des calcaires du Carbonifère.

IV.2.9. Caractère des nappes

Le caractère des nappes rencontrées est spécifié : nappe libre, nappe semi-captive (semi-libre) ou nappe captive. Cette détermination est basée sur le contexte géologique et hydrogéologique régional. Notons qu'il a été choisi de caractériser la première nappe rencontrée (nappe à l'affleurement, sous la couverture limoneuse). Cette information est cartographiée sur l'une des cartes thématiques présentées sur le poster. Sur la carte Modave-Clavier, toutes les nappes sont considérées comme des nappes libres, à l'exception des nappes logées dans le Houiller. Les nappes logées dans les horizons schisto-gréseux du Houiller sont souvent considérées comme semi-captives. En effet, dans ces terrains, la nappe peut se retrouver en charge sous les couches plus argileuses (shales, siltites, phyllades, argile d'altération). Il faut également considérer que la partie de l'aquifère des calcaires carbonifères située sous les formations schisto-gréseuses du Houiller peut, localement et temporairement, être captive, si la puissance du Houiller le permet.

IV.2.10. Piézométrie de la carte Modave-Clavier

La structure géologique complexe, constituée d'une succession d'anticlinaux gréseux et de synclinaux calcaires, empêche l'établissement d'une carte piézométrique globale pour l'ensemble de la carte hydrogéologique de Modave-Clavier. En effet, ces discontinuités géologiques induisent une séparation des aquifères. De plus, les possibilités de mesure du niveau piézométrique ne sont pas homogènes sur tout le territoire de la zone étudiée (répartition inégale de ouvrages, accessibilité des puits...). Ainsi, les isopièzes n'ont pu être tracés que sur deux secteurs, dans les zones d'alimentation des galeries dans l'entité de Modave (captage VIVAQUA) et dans l'entité de Clavier (captage CILE). Des cotes ponctuelles, avec la date de prise de la mesure, sont également reportées sur la carte principale (1/25 000) et sur plusieurs cartes des figures des sous-chapitres précédents.

A défaut d'une couverture piézométrique complète permettant de détailler le sens de l'écoulement souterrain, le niveau de la nappe ou encore le gradient piézométrique, quelques considérations générales peuvent être émises. Les écoulements souterrains ont lieu selon l'étirement des synclinaux calcaires. Les limites des bassins hydrogéologiques correspondent approximativement aux limites de bassins hydrologiques. Un léger décalage est parfois observé. Par exemple, entre les bassins du Hoyoux et du Samson où la ligne de partage des eaux souterraines se situe vraisemblablement à l'intérieur du bassin du Hoyoux (donc transfert d'eau vers le sud-ouest vers le Samson). Notons qu'à l'intérieur des bassins principaux (Hoyoux, Néblon), des transferts entre sous-bassins peuvent avoir lieu (Torrent de Bonne vers Hoyoux, bassins des ruisseaux d'Ocquier et d'Ouffet vers Néblon). Le réseau hydrographique pérenne constitue, en général, l'exutoire des nappes aquifères (drainage), indiquant ainsi le sens global de l'écoulement des eaux souterraines. Le Hoyoux, qui recoupe la succession d'anticlinaux gréseux et de synclinaux calcaires selon une direction sud-nord, constitue le niveau de base des aquifères d'une grande partie de la région étudiée (ouest et nord-est de la carte). Les eaux souterraines de la partie orientale de l'entité de Clavier sont drainées par le Néblon et l'Ourthe.

Des lignes de sources sont souvent visibles au contact de formations de perméabilités différentes. Ainsi, de tels alignements sont observables entre le Famennien et le Carbonifère, dus à la présence des Formations de Maurenne (calcschistes) et de Pont-d'Arcole (shales) ou bien entre le Houiller grésoschisteux et les calcaires viséens.

Dans les aquifères calcaires, la nappe est susceptible d'être plus rabattue que dans les autres unités hydrogéologiques, présentant ainsi des niveaux d'eau relativement profonds. Les écarts entre les hautes eaux et les basses eaux sont également plus marqués. Dans les aquifères moins perméables, la surface piézométrique est souvent proche de la surface topographique et est davantage influencée par la topographie. Dans les unités hydrogéologiques de nature gréseuse, schisto-gréseux, quartzitique ou quartzo-phylladeuse, on rencontre généralement deux types de nappes: nappe superficielle et nappe profonde. Généralement, le schéma piézométrique décrit ci-après est observé dans ces terrains. Des niveaux d'eau peu profonds sont relevés, entre quelques dm à quelques m par rapport à la surface topographique, indiquant une nappe subaffleurante. Des profondeurs d'eau plus importantes sont aussi observées. Ces niveaux d'eau caractérisent la nappe logée dans les terrains plus fracturés et gréseux du bed-rock. Ces horizons aquifères peuvent localement être semi-captifs à captifs.

Sur la carte Modave-Clavier, le niveau d'eau dans les nappes calcaires varie annuellement avec des amplitudes de 1 à 10 m, voire 15 m, à l'exception de la nappe située dans le bassin du Néblon dont les variations peuvent atteindre 30 m. L'amplitude des fluctuations piézométriques est fonction de l'emplacement des piézomètres dans le bassin hydrogéologique. En tête de bassin, au niveau des zones de crêtes piézométriques, l'écart entre les hautes eaux et les basses eaux est maximal. A l'inverse; au droit des puits situés à proximité de captages ou de cours d'eau drainants ou encore implantés dans un réseau karstique important, le niveau piézométrique varie faiblement. La dynamique de la nappe est, en général, assez rapide. L'élévation du niveau piézométrique est souvent assez synchrone avec les pics d'eau utile. Seuls les forages atteignant les calcaires sous une couverture de dépôts terrigènes du Houiller montrent un décalage entre les précipitations et la hausse piézométrique (effet retard dû à la couche peu perméable ou dû à l'éloignement de la zone de recharge). La disponibilité en eau utile⁸ se limite à la période automne-hiver (soit d'octobre à avril). Les nappes sont alors rechargées (élévation du niveau piézométrique) et un ruissellement est observé. De mai à septembre, le débit des rivières (donc l'écoulement de base) est principalement assuré par la vidange des aquifères, si le cours d'eau est drainant (Brouyère et al, 2009).

⁸ On entend, ici, par eau utile, la quantité d'eau disponible pour le ruissellement et l'infiltration (lame d'eau exprimée en mm).

V. CADRE HYDROCHIMIQUE

Les analyses chimiques présentées dans les paragraphes suivants ont été réalisées sur des eaux brutes (sauf si indiqué), non encore traitées en vue de leur consommation. Nous ne disposons pas de données suffisantes pour offrir le même degré de détails sur l'hydrochimie de toutes les unités hydrogéologiques de la carte.

En Région wallonne, depuis l'entrée en vigueur du Code de l'Eau (3 mars 2005), toute la législation relative à l'eau a intégré les anciens textes réglementaires (décrets et articles). L'arrêté relatif aux valeurs paramétriques applicables aux eaux destinées à la consommation humaine (AGW 15 janvier 2004) se retrouve dans les articles R.252 à R.261 de la partie réglementaire du Livre II du Code de l'Environnement. Les annexes décrivant, entre autres, les valeurs fixées pour les paramètres retenus sont reprises sous les numéros XXXI à XXXIV.

Sur la carte Modave-Clavier, plusieurs carrières (calcaires, dolomies, grès ou 'psammites du Condroz'...), sablières et argilières ont jadis été exploitées dans le Condroz, ainsi que quelques mines souterraines de charbon. En 2005, trois carrières étaient encore en activité sur le territoire de la carte (Barchy et Marion, sous presse). Ces anciens sites d'extraction abandonnés et parfois remblayés avec des déchets et matériaux divers sont des points d'infiltration privilégiés vers les eaux souterraines, tout comme le sont les dolines, chantoirs et autres phénomènes karstiques. Ces chemins directs depuis la surface vers les eaux souterraines sont donc des lieux à surveiller.

Un inventaire de ces données est disponible auprès des autorités régionales (DGARNE et DGATLPE du SPW). Depuis 1998, la DGARNE a mis en place un réseau de contrôle des centres d'enfouissement technique (CET). Ce réseau est géré par l'ISSeP. Des informations sont disponibles via le portail Internet du Service Public de Wallonie: <http://environnement.wallonie.be/data/dechets/cet/>. La SPAQuE a inventorié les sites potentiellement contaminés en Wallonie. Ils sont répertoriés dans une banque de données, WALSOLS, consultable sur <http://www.walsols.be/>. Sur la carte Modave-Clavier, deux sites sont répertoriés dans cette base de données. Il s'agissait d'anciens dépôts de pneus, situés sur les communes de Modave (code: Lg5101-01) et de Ohey (code: Nr2702-01). Ces déchets ont maintenant été enlevés.

Dans le cadre de la mise en œuvre de la Directive cadre sur l'eau (Directive 2000/60/CE, en abrégé DCE), le Service Public de Wallonie a établi un programme de surveillance des 33 masses d'eau définies en Wallonie (http://environnement.wallonie.be/directive_eau). Au niveau des eaux souterraines, un réseau de surveillance de l'état quantitatif et qualitatif a été élaboré et finalisé en décembre 2006. Sur le territoire couvert par la carte, deux masses d'eau souterraine sont distinguées (figure V.1):

- les calcaires et grès du Condroz – RWM021
- les calcaires et grès de la Calestienne et de la Famenne – RWM023

L'état global DCE de ces masses d'eau (établi en 2009) est synthétisé dans le tableau V.1. Pour ces masses d'eau, le paramètre 'nitrates' est classé comme 'moyen'. Pour la masse d'eau RWM021, l'altération 'Pesticides' est classée également comme à un niveau 'moyen'. Ainsi ces deux paramètres sont à surveiller pour RWM021, tout comme les interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines, et l'impact du secteur carrier (DGARNE-DESO et Protectis-Cellule DCE, 2010). Sur le territoire de la carte Modave-Clavier, on compte 6 points du réseau de surveillance. Tous concernent la masse d'eau RWM021. Il s'agit de:

- Captage de Modave (galerie)(VIVAQUA), 48/7/2/002;
- Vyle (source), 48/7/2/020;
- La Vanne (galerie)(CIESAC), 48/7/6/001;
- Château de Bouillon (galerie)(VIVAQUA), 48/7/8/002;
- Soheit Tinlot Forage ULg (puits), 48/8/2/002;
- Fond Saint Martin (source)(CIESAC), 48/8/8/002.

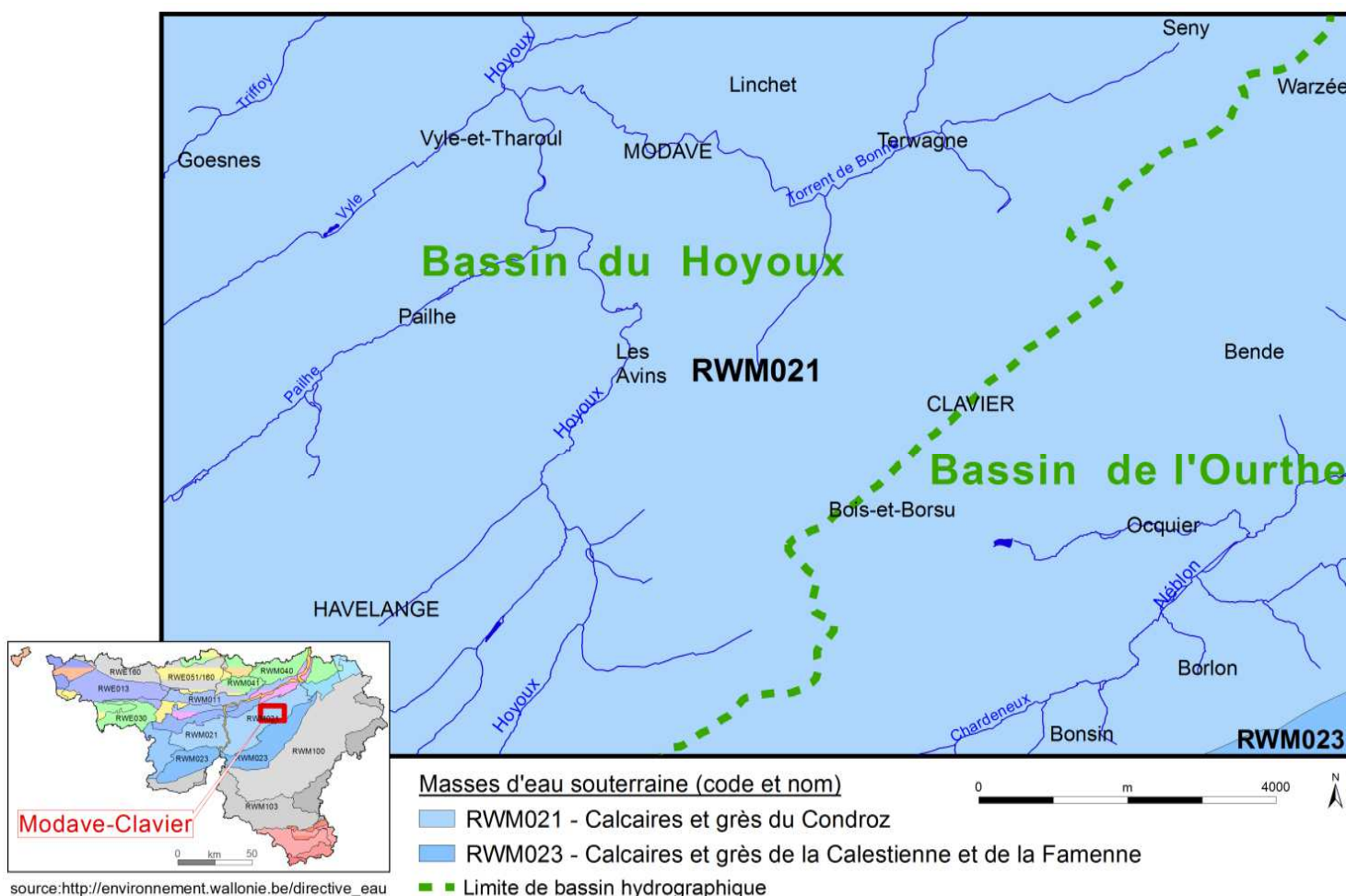


Figure V.1: Masses d'eau souterraine – Modave-Clavier

Tableau V.1: Etat des masses d'eau souterraines de la carte Modave-Clavier

MESO	Etat global	Etat chimique	Etat quantitatif	Paramètre déclassant
RWM021	Bon	Bon	Bon	Aucun
RWM023	Bon	Bon	Bon	Aucun

V.1. CARACTERISTIQUES HYDROCHIMIQUES DES EAUX

Les analyses disponibles pour définir le faciès hydrochimique des eaux logées dans les terrains de la carte Modave-Clavier sont issues des captages destinés à la distribution publique d'eau potable, des réseaux de surveillance du SPW et de campagnes de terrain réalisées par l'équipe d'Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement de l'ULg. Par manque de données (soit absence de prises d'eau, soit pas d'échantillonnage), toutes les unités hydrogéologiques de la carte étudiée ne seront caractérisées hydrochimiquement. Afin de compléter les données hydrochimiques issues d'échantillons de prises d'eau localisées sur la carte Modave-Clavier, sont reprises à titre indicatif les informations sur la géochimie des aquifères de "l'Etat des nappes d'eau souterraine de la Wallonie" (SPW-DGO3, 2014). Ces résultats sont à considérer globalement. Ils sont représentatifs d'une masse d'eau souterraine dans son ensemble, et pas forcément pour la zone de cette masse d'eau présente sur la carte étudiée.

Identifier rapidement les faciès hydrochimiques des eaux souterraines est l'une des étapes de caractérisation des nappes aquifères. Le diagramme de Piper est l'une des représentations graphiques couramment utilisées pour définir les types d'eau. Le diagramme de Piper est composé de deux diagrammes ternaires dans lesquels sont reportés les proportions en cations et en anions. Le troisième diagramme reprend une synthèse des deux précédents et permet de rapidement caractériser l'eau analysée. Chaque sommet des triangles représente 100% d'un des trois constituants. Pour les cations, on représente en général Ca^{++} , Mg^{++} et $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ tandis que pour les anions, il s'agit de Cl^- , SO_4^{--} et $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{--}$, avec parfois NO_3^- (proportions relatives).

Cette méthode graphique appliquée à plusieurs prises d'eau souterraine de la carte Modave-Clavier permet d'obtenir les résultats de la figure V.2. Les unités hydrogéologiques caractérisées sont les calcaires du Carbonifère et les grès du Famennien, ainsi que le Houiller. Leurs eaux présentent un faciès bicarbonaté calcique. Néanmoins, quelques particularités se présentent. L'échantillon 'Ocquier'(4), provenant de l'aquiclude à niveaux aquifères du Houiller, a des teneurs en chlorures et en sulfates proportionnellement plus importantes que les eaux originaires des formations calcaires. L'échantillon 'Havelange', (1) issu des grès du Famennien, est proportionnellement moins riche en calcium et plus riche en sodium et potassium. Parmi les eaux en provenance des calcaires du Carbonifère (2, 3, 5, 6), celles du bassin du Néblon (3) sont moins riches en magnésium.

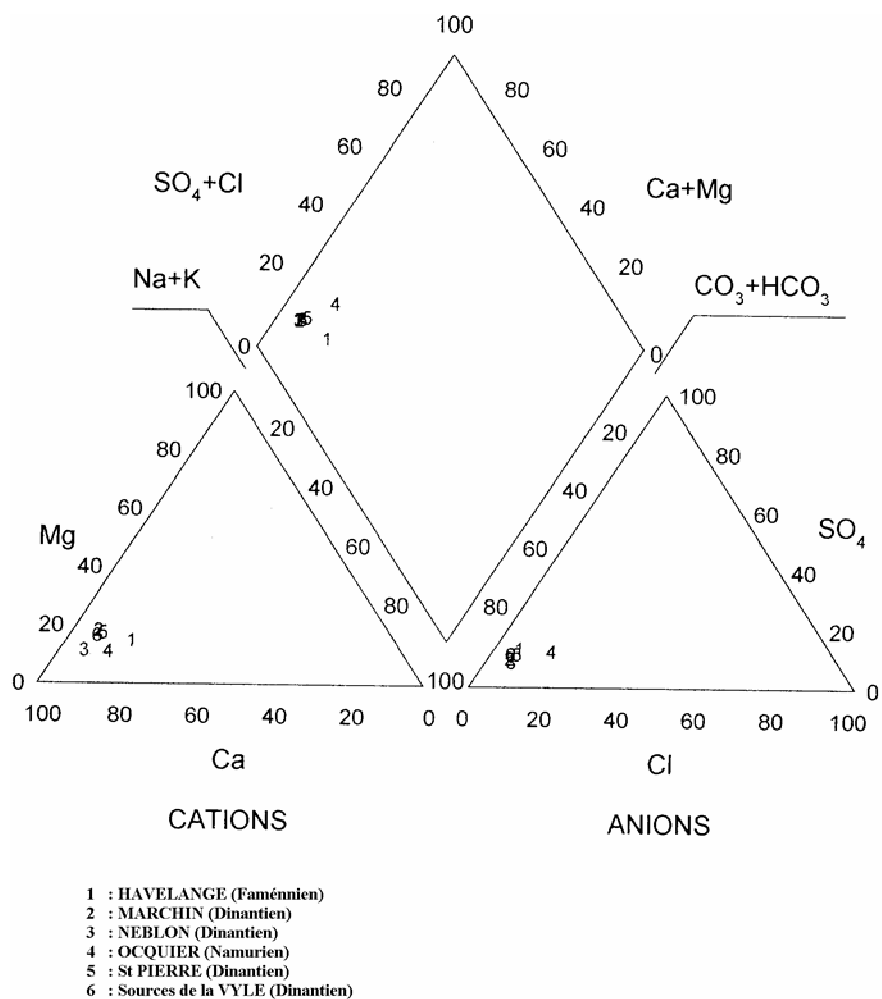


Figure V.2: Diagramme de Piper des eaux souterraines de la carte Modave-Clavier

V.1.1. Aquifère des calcaires du Carbonifère

L'aquifère des calcaires du Carbonifère occupant une grande superficie de la carte Modave-Clavier et étant la ressource en eau souterraine la plus exploitée sur cette carte, c'est logiquement que beaucoup de données hydrochimiques y sont disponibles. Trois tableaux avec les éléments majeurs et quelques autres paramètres chimiques sont présentés dans ce chapitre (Tableaux V.2 à V.4). Ils sont organisés par entités hydrogéologiques (telles que définies au chapitre IV.2).

Les eaux des calcaires carbonifères de la région de Modave-Clavier présentent un faciès bicarbonaté calcique, de dureté et de conductivité élevées. L'alcalinité est moyenne à forte. Le pH est basique. Les teneurs en nitrates sont très variables d'un point à l'autre, avec quelques dépassements de la norme de potabilité, fixée à 50 mg/l. Dans les tableaux suivants, on observe des valeurs élevées pour certains éléments pour quelques échantillons. Bien que ces résultats restent inférieurs aux normes en vigueur, ces ouvrages sont à surveiller pour déterminer s'il s'agit d'une contamination accidentelle ponctuelle ou d'une pollution avérée.

Bien que les galeries du Néblon (CILE) ne soient pas localisées sur la carte étudiée, mais étant donné que leur zone d'alimentation est majoritairement située sur cette carte, les caractéristiques chimiques des eaux prélevées sont reprises dans le Tableau V.4.

Tableau V.2: Caractéristiques hydrochimiques de l'aquifère des calcaires du Carbonifère – Synclinaux de Marchin et de Vyle-et-Tharoul

Élément	Unité	Niveau-guide RW	Synclinal de Marchin	Synclinal de Vyle-et-Tharoul		Calcaires carbonifères du bassin de Dinant (An02) 1994-2000
			Jamagne (VIVAQUA)	Limet (CILE)	F8-Tharoul (SPW)	
		Code de l'Eau	07/03/2012	06/11/2013	09/10/2014	
pH		6,5 à 9,5	7,5	7,05	7,34	7,4
Conductivité (K20)	µS/cm	2100	603	610	674,6	590
Dureté totale (TH)	°F	67,5	35,6	35,9	29,1	33,2
Alcalinité totale (TAC)	°F	-	28	26,8	25,7	-
Calcium	mg/l	270*	101	104,7	97,5	107
Magnésium	mg/l	50*	25,2	23,8	11,7	16,6
Sodium	mg/l	150	6,9	7,6	39,6	11
Potassium	mg/l	12	1,8	1,39	1,7	2,31
Bicarbonates	mg/l	-	-	327	311,7	324,1
Strontium	µg/l	750**	140 (09/2009)	134	-	120
Fer total dissous	µg/l	200*	<5	<20	130	17
Manganèse	µg/l	50*	<0,5	<0,5	20	3
Sulfates	mg/l	250*	41	52,2	24,8	40,9
Chlorures	mg/l	200	22,2	25,8	46,7	32,1
Fluorures	mg/l	1,5*	0,072	0,086	<0,1	0,11
Nitrates	mg/l	50	24,9	14,8	38,7	23,4
Nitrites	mg/l	0,1	<0,03	<0,01	<0,02	<0,01
Ammonium	mg/l	0,5*	<0,05	0,03	<0,05	0,01
Silice (SiO ₂)	mg/l	-	10,2	10,5	13,5	9,4
* norme de potabilité à défaut de valeur-guide - ** selon la Directive européenne						SPW-DGO3, 2014

Tableau V.3: Caractéristiques hydrochimiques de l'aquifère des calcaires du Carbonifère – Entité de Modave

Elément	Unité	Niveau-guide RW	Galerias de Modave(VIVAQUA)	Briffoz P2	F7-Ochain (SPW)	La Vanne (CIESAC)	F11-Havelange (SPW)
	Code de l'Eau		05/06/2014	26/03/2014	09/10/2014	02/04/2014	10/10/2014
pH		6,5 à 9,5	7,48	7,58	7,14	7,7	7,01
Conductivité (K20)	µS/cm	2100	632	591	821,5	621	554,1
Dureté totale (TH)	°F	67,5	34,1	-	46,1	35,2	32,1
Alcalinité totale (TAC)	°F	-	28,3	27	37,9	27,95	26,7
Calcium	mg/l	270*	97	105	114,8	101	97,2
Magnésium	mg/l	50*	24,2	16,7	42,5	22,1	19,2
Sodium	mg/l	150	8,9	6,5	9,1	7,14	6,1
Potassium	mg/l	12	1,4	0,6	2,9	1,26	1,04
Bicarbonates	mg/l	-	-	-	461,04	-	324,3
Strontium	µg/l	750**	135	106,4	-	127	-
Fer total dissous	µg/l	200*	<5	38	90	9	230
Manganèse	µg/l	50*	<1	0,4	20	<4	50
Sulfates	mg/l	250*	42,1	35,4	24,8	34,8	29,6
Chlorures	mg/l	200	25,1	16,3	27,6	17,8	16,2
Fluorures	mg/l	1,5*	0,07	0,05	<0,1	0,1	<0,1
Nitrates	mg/l	50	21,5	32,6	52,1	27,3	23,6
Nitrites	mg/l	0,1	<0,03	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Ammonium	mg/l	0,5*	<0,05	<0,05	1,45	<0,05	0,27
Silice (SiO ₂)	mg/l	-	10,3	7,4	9,6	9,1	7,8

* norme de potabilité à défaut de valeur-guide - ** selon la Directive européenne

Tableau V.4: Caractéristiques hydrochimiques de l'aquifère des calcaires du Carbonifère – Entité de Clavier

Elément	Unité	Niveau-guide RW	Château de Bouillon(VIVAQUA)	Fond Saint Martin (CIESAC)	Bor4 – Ferme des Moines	Galerie Principale - Néblon (CIE F)	Calcaires carbonifères du bassin de Dinant
	Code de l'Eau		05/06/2014	02/04/2014 - Prél. sur réseau	29/10/2014	07/07/2014	1994-2000
pH		6,5 à 9,5	7,45	7,5	8,47	7,38	7,4
Conductivité (K20)	µS/cm	2100	582	610	835,2	640	590
Dureté totale (TH)	°F	67,5	31,5	32,7	44,8	36,7	33,2
Alcalinité totale (TAC)	°F	-	26,7	28,5	36,4	29,5	-
Calcium	mg/l	270*	93	104	161,7	116,8	107
Magnésium	mg/l	50*	19,8	19,8	10,8	18,5	16,6
Sodium	mg/l	150	7,1	6,34	19,3	7,8	11
Potassium	mg/l	12	1,7	0,7	27,1	1,28	2,31
Bicarbonates	mg/l	-	-	-	442,9	360	324,1
Strontium	µg/l	750**	128	132	-	143	120
Fer total dissous	µg/l	200*	<5	8	130	<20	17
Manganèse	µg/l	50*	<1	<4	30	<0,5	3
Sulfates	mg/l	250*	32,7	27,9	43,9	29,2	40,9
Chlorures	mg/l	200	18,8	16,6	52,8	23,6	32,1
Fluorures	mg/l	1,5*	0,09	0,1	<0,1	0,115	0,11
Nitrates	mg/l	50	24,4	25,2	50,9	37,6	23,4
Nitrites	mg/l	0,1	<0,03	<0,02	<0,02	<0,01	<0,01
Ammonium	mg/l	0,5*	<0,05	<0,05	0,7	<0,03	0,01
Silice (SiO ₂)	mg/l	-	9	7,84	14,7	9,2	9,4

* norme de potabilité à défaut de valeur-guide - ** selon la Directive européenne

SPW-DGO3, 2014

V.1.2. Aquifère des grès du Famennien

L'aquifère logé dans les grès fameniens du Condroz est caractérisé par une eau faiblement à moyennement minéralisée et un pH basique (Tableau V.5). Les teneurs, parfois importantes, du calcium, du magnésium et des bicarbonates peuvent être dues au ciment carbonaté et/ou dolomitique présent dans les grès. Les teneurs en nitrates, sulfates et chlorures sont parfois non négligeables (pollution anthropique). L'échantillon de la prise d'eau 'Limonaderie' est marqué par des concentrations plus importantes sur plusieurs paramètres, sans doute dues à la nature de l'ouvrage (source) et à sa localisation (milieu semi-urbain, à hauteur de Pont-de-Bonne).

Tableau V.5: Caractéristiques hydrochimiques de l'aquifère des grès du Famennien

Elément	Unité	Niveau-guide RW	Bois de Bassin 1 (AIEC)	Limonaderie	PP15 Ossogne	Du Préau	Massif schisto-gréseux du bassin de Dinant (Aq11)
	Code de l'Eau		18/10/2010	13/11/2007	20/07/2006	14/06/2006	1994-2000
pH		6,5 à 9,5	7,24	8,75	8,26	8,06	7,3
Conductivité (K20)	µS/cm	2100	290	621	388	452	443
Dureté totale (TH)	°F	67,5	11,6	28,4	20,5	19,9	22,1
Alcalinité totale (TAC)	°F	-	9,	20,1	18,8	10,1	-
Calcium	mg/l	270*	39,2	82,2	45,4	60,1	65,7
Magnésium	mg/l	50*	4,4	19,3	22,2	11,9	11,9
Sodium	mg/l	150	7	23,5	6,2	11,3	9,1
Potassium	mg/l	12	1,3	3,4	1,6	1,7	1,82
Bicarbonates	mg/l	-	-	237,4	224,5	121,5	185,1
Strontium	µg/l	750**	60,1	-	-	-	102
Fer total dissous	µg/l	200*	12	15	4	6	71
Manganèse	µg/l	50*	3,3	1	<5	2	41
Sulfates	mg/l	250*	10,4	39,7	12,1	30,3	31,6
Chlorures	mg/l	200	8,2	48,4	8,8	37	23,1
Fluorures	mg/l	1,5*	0,189	<0,1	<0,2	<0,2	0,07
Nitrates	mg/l	50	3,19	28,1	2,5	49,2	26,5
Nitrites	mg/l	0,1	<0,02	<0,02	<0,02	<0,2	0,01
Ammonium	mg/l	0,5*	<0,05	<0,05	<0,1	0,15	0
Silice (SiO ₂)	mg/l	-	15,2	10,8	17,1	21,5	13,2
* norme de potabilité à défaut de valeur-guide - ** selon la Directive européenne							SPW-DGO3, 2014

V.1.3. Aquiclude à niveaux aquifères du Houiller

Cette unité hydrogéologique ne constitue pas une ressource en eau importante à l'échelle de la carte Modave-Clavier, dès lors très peu d'ouvrages la sollicitent. Ainsi peu d'échantillons sont disponibles pour caractériser les eaux logées dans les formations schisto-gréseuses du Houiller (Tableau V.6). Ces eaux présentent, en général, une légère acidité et une faible dureté.

Tableau V.6: Caractéristiques hydrochimiques de l'aquiclude à niveaux aquifères du Houiller

Elément	Unité	Niveau-guide RW	Maréchal (puits fermier)	Puits Ocquier
		Code de l'Eau	23/10/2014	
pH		6,5 à 9,5	7,59	6,55
Conductivité (K20)	µS/cm	2100	486,5	250
Dureté totale (TH)	°F	67,5	18,1	13
Alcalinité totale (TAC)	°F	-	17,2	-
Calcium	mg/l	270*	55,9	41,4
Magnésium	mg/l	50*	10,1	3,4
Sodium	mg/l	150	31,1	4,6
Potassium	mg/l	12	11,04	1,6
Bicarbonates	mg/l	-	209,7	89,1
Strontium	µg/l	750**	-	-
Fer total dissous	µg/l	200*	410	-
Manganèse	µg/l	50*	60	-
Sulfates	mg/l	250*	30,9	15,4
Chlorures	mg/l	200	30,6	18,5
Fluorures	mg/l	1,5*	<0,1	-
Nitrates	mg/l	50	23,9	43,9
Nitrites	mg/l	0,1	<0,02	0,02
Ammonium	mg/l	0,5*	0,7	0,02
Silice (SiO ₂)	mg/l	-	8,32	1,9

V.2. PROBLEMATIQUE DES NITRATES

Pour protéger les eaux contre la pollution par les nitrates, plusieurs "zones vulnérables" ont été désignées par arrêtés ministériels (figure V.2). Ces zones reprennent la quasi-totalité des captages échantillonnés dont la teneur en nitrate dépasse ou risque de dépasser 50 mg/l. Elles ont pour objet la protection des eaux souterraines contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles. Cette désignation implique l'application d'un programme d'action précis dont les mesures ont été arrêtées dans le code de "bonne pratique agricole" du Programme de Gestion Durable de l'Azote en agriculture (PGDA). Pour plus d'informations, voir www.nitrawal.be, ainsi que le Livre II du Code l'Environnement ([Code de l'Eau](#)).

Le territoire couvert par la carte Modave-Clavier est entièrement inclus dans une de ces zones vulnérables aux nitrates définies par le gouvernement wallon, zone 'Sud Namurois' (arrêté ministériel du 22 novembre 2012 modifiant celui du 22 décembre 2006).

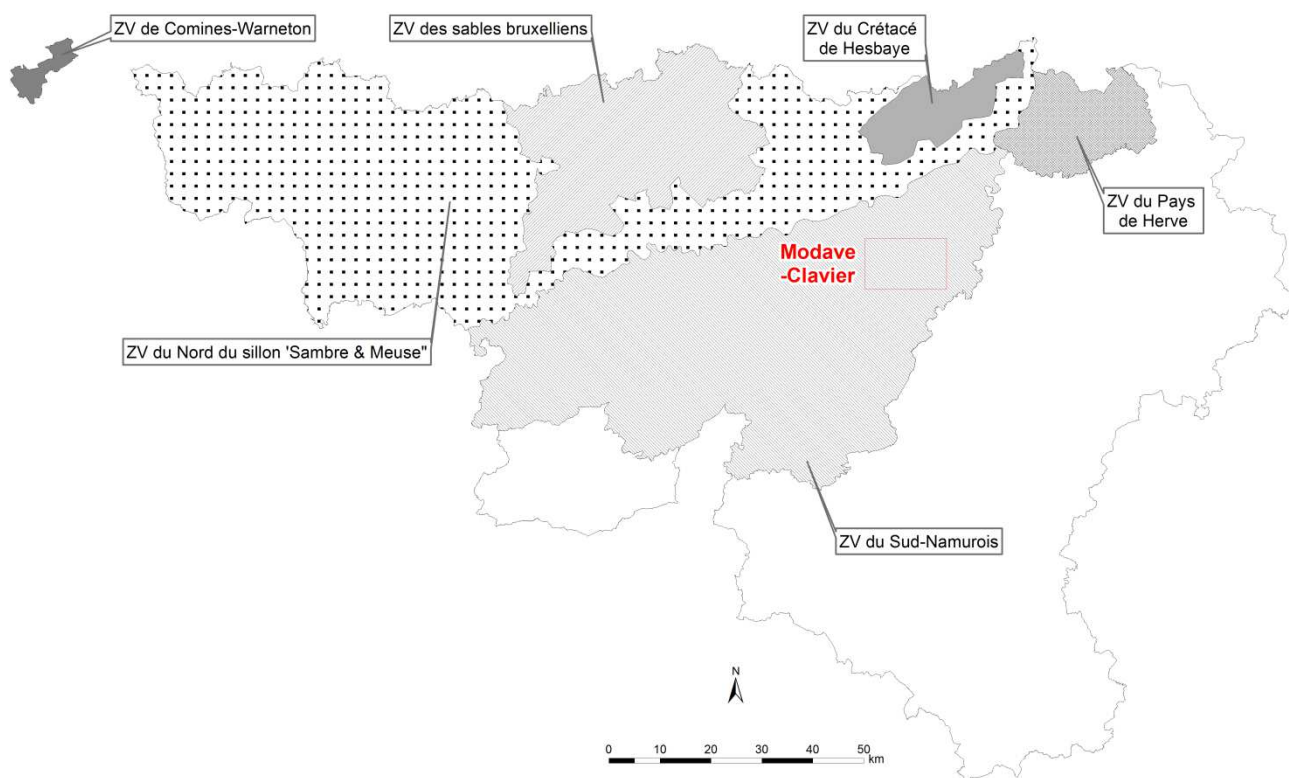


Figure V.3: Zones vulnérables aux nitrates – Modave-Clavier

Depuis plusieurs années, les compagnies de distribution d'eau et l'administration wallonne surveillent de manière très régulière les concentrations en nitrates de plusieurs différents captages ou puits de contrôle. La teneur maximale admise en Wallonie est 50 mg NO₃/l. On ne dispose pas de suffisamment de données pour présenter un historique représentatif de l'évolution des concentrations des nitrates dans les eaux souterraines pour l'ensemble des unités hydrogéologiques présentes sur la carte Modave-Clavier.

D'après les données disponibles, les concentrations en nitrates des eaux souterraines de la carte étudiée ne dépassent pas les normes de potabilité. Les figures suivantes présentent l'évolution des concentrations en nitrates au cours du temps au droit de quelques ouvrages de prise d'eau publics.

En général, sur la carte Modave-Clavier, les teneurs en nitrates dans les eaux issues des calcaires carbonifères (Condroz) oscillent entre 20 et 25 mg/l (Figures V.4, V.5, V.6). A l'exception du piézomètre F6-Tinlot, tous les ouvrages sont des prises d'eau destinée à la distribution publique d'eau potable.

La concentration moyenne en nitrates dans les eaux prélevées à la source de Jamagne est de 25 mg/l (Figure V.4). Une augmentation est observée dès 1997. Cette tendance semble s'inverser dès 2004.

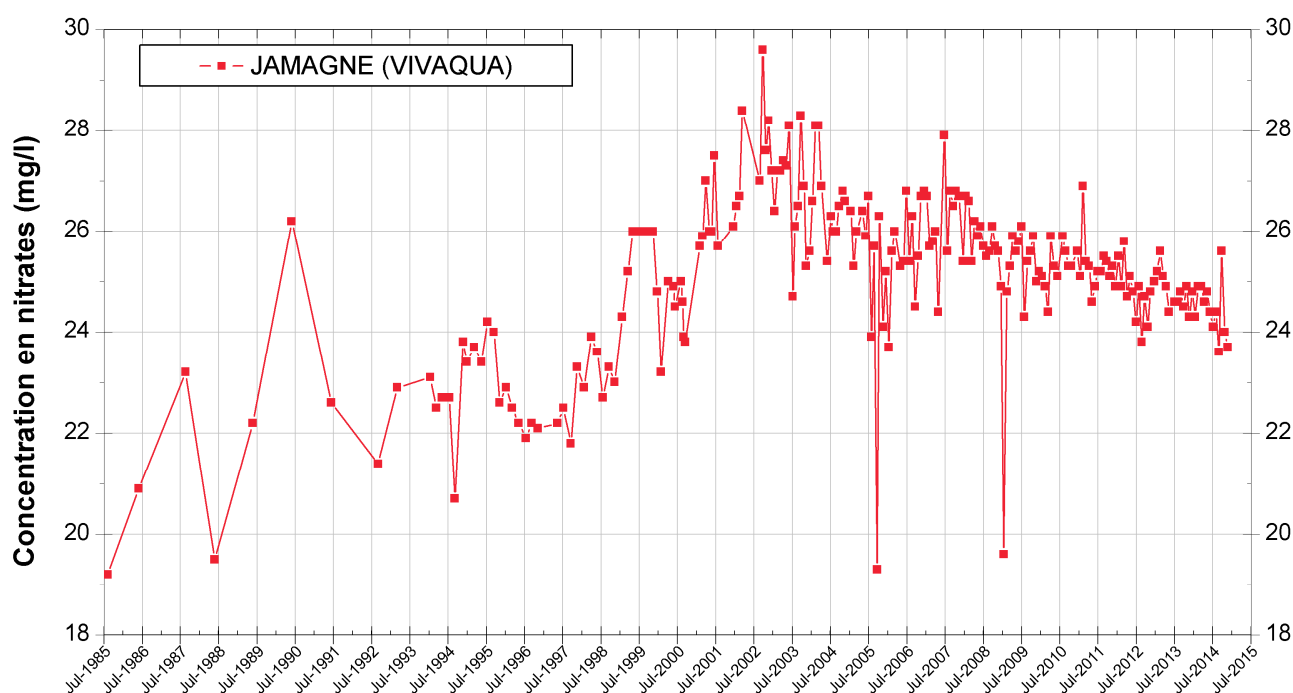


Figure V.4: Evolution des concentrations en nitrates – Synclinal de Marchin - Aquifère des calcaires du Carbonifère

Les teneurs en nitrates observées dans les eaux logées dans l'entité calcaire de Modave, tout en restant nettement sous la norme de potabilité, fluctuent beaucoup (Figure V.5). Un saut à la hausse, d'environ 5 mg/l, est observé dès 2005 à la prise d'eau 'Petit Avin' et dès 2007 à 'La Vanne' (branche sud de l'entité hydrogéologique de Modave). Une augmentation de la concentration en nitrates dans les eaux des galeries de Modave est également mesurée, bien que plus graduellement et légèrement moins marquée. Les valeurs mesurées dans les échantillons d'eau prélevés au piézomètre F6-Tinlot sont plus élevées (moyenne: ≈ 32 mg/l NO_3). Ce forage est situé en pleine campagne, au milieu des champs.

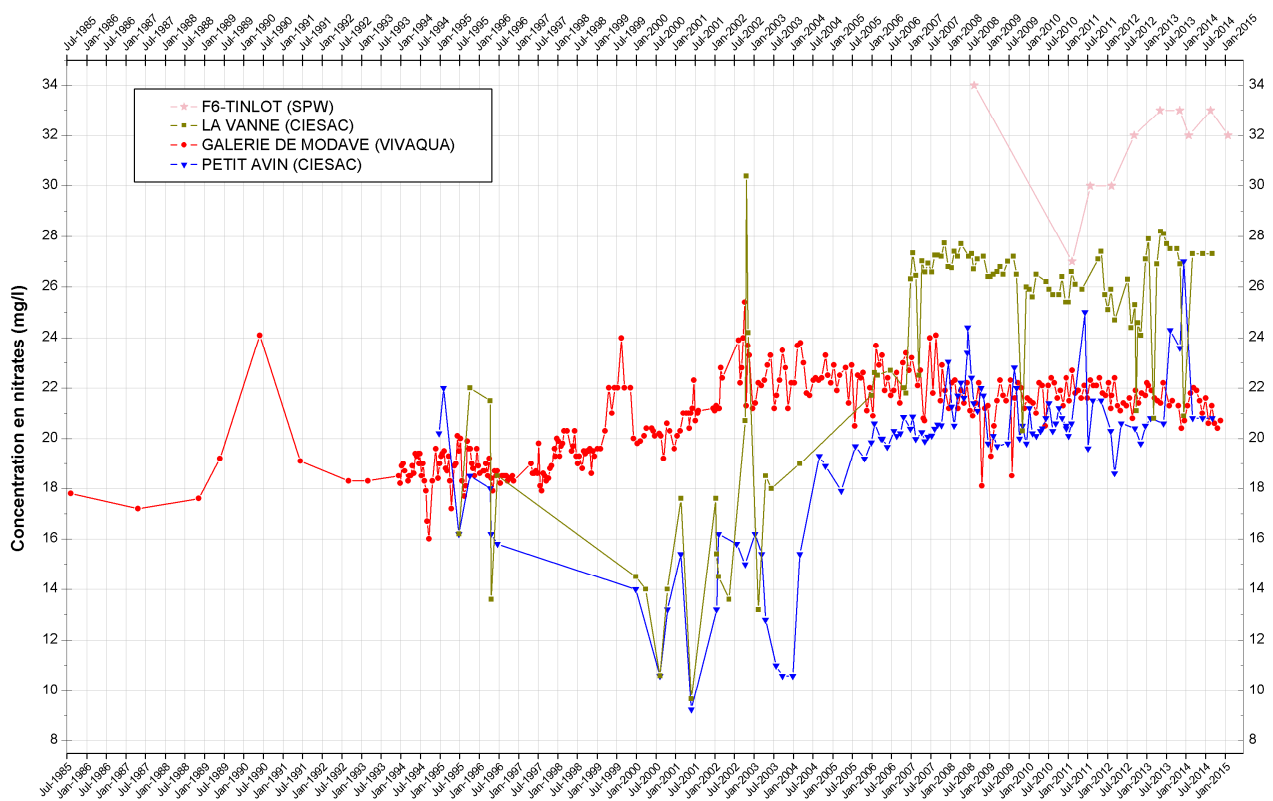


Figure V.5: Evolution des concentrations en nitrates – Entité de Modave - Aquifère des calcaires du Carbonifère

Les eaux captées dans l'entité hydrogéologique calcaire de Clavier présentent également des variations notables (Figure V.6). Les concentrations mesurées au captage 'Fond Saint Martin' s'équilibrent autour de 23 mg/l NO_3 , avec cependant une période avec des valeurs plus basses (entre 2001 et 2003). Les teneurs en nitrates observées à la source 'Haveligeoule' fluctuent beaucoup. Elles sont, en général, élevées, à l'exception de 2013. Les eaux de la prise d'eau 'Château de Bouillon' présentent une concentration en nitrates relativement constante. On observe néanmoins une augmentation graduelle (de 20 à 24 mg/l NO_3).

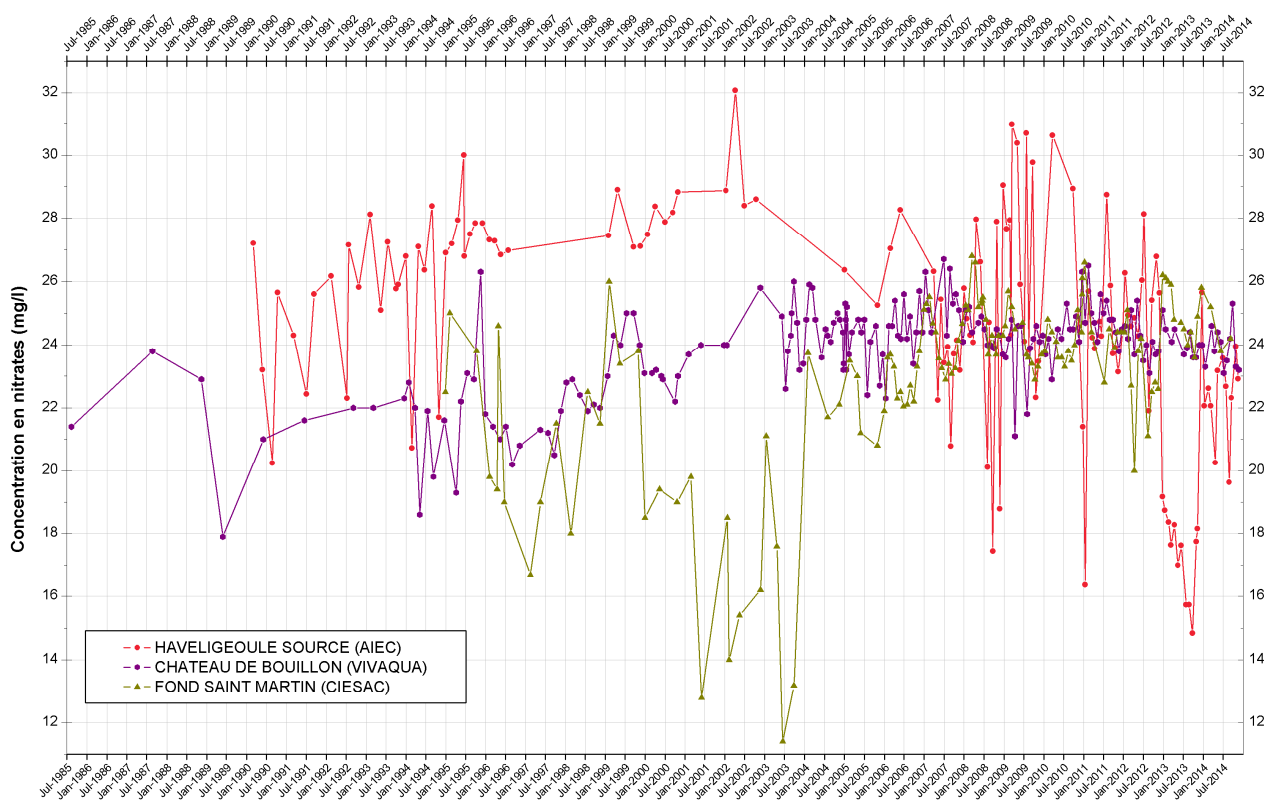


Figure V.6: Evolution des concentrations en nitrates – Entité de Clavier - Aquifère des calcaires du Carbonifère

Peu de données sont disponibles sur les nitrates dans les eaux logées dans les unités hydrogéologiques du Famennien. Uniquement une chronique des teneurs en nitrates observées dans l'aquifère des grès du Famennien est disponible. Elle concerne le puits P1 de Bois de Bassin (Figure V.7). Les concentrations ne dépassent pas la norme de potabilité (50 mg/l). Excepté entre 2005 et 2008, les valeurs mesurées au captage sont faibles.

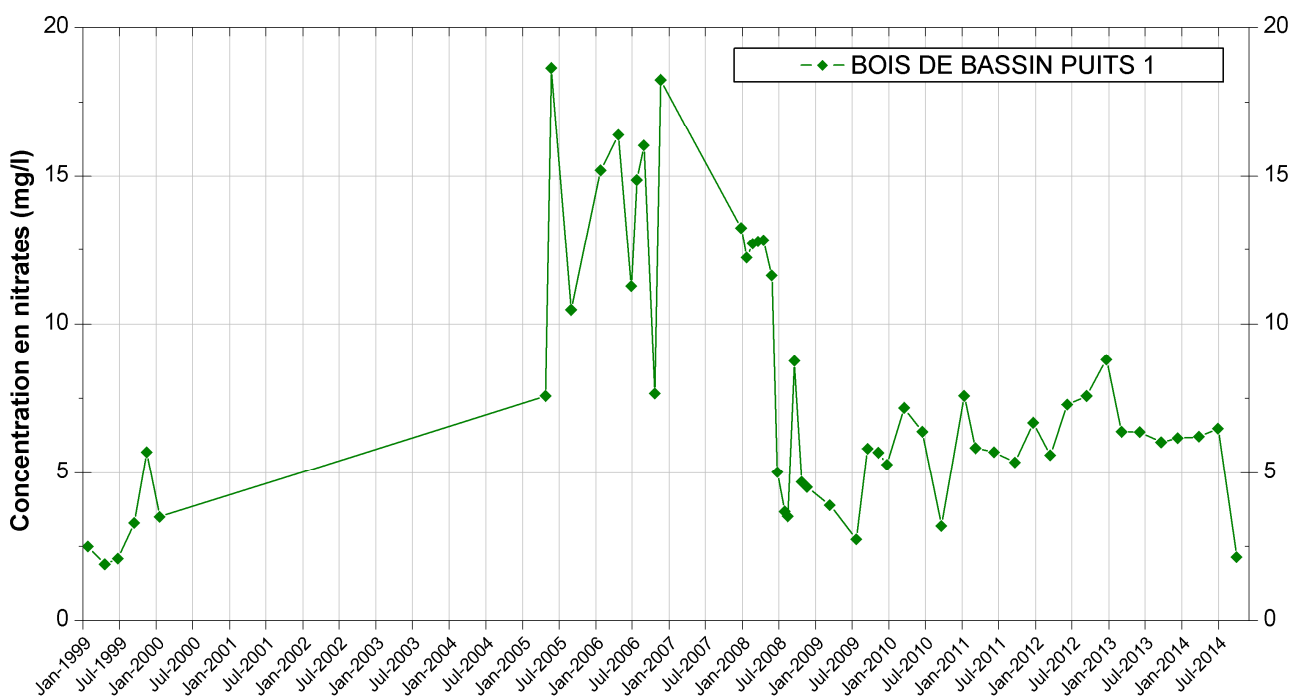


Figure V.7: Evolution des concentrations en nitrates - Aquifère des grès du Famennien

V.3. QUALITE BACTERIOLOGIQUE

Les paramètres microbiologiques des eaux destinées à la distribution publique sont régulièrement mesurés par les compagnies d'eau. Ainsi, la qualité microbiologique des eaux est mesurée à partir de la présence de bactéries indicatrices de contamination fécale telles que les entérocoques, E.Coli ou les coliformes.

D'après les données disponibles pour les unités hydrogéologiques de la carte Modave-Clavier, il semble que ses eaux souterraines ne présentent pas d'anomalies importantes au niveau bactériologique (tableau V.7). Une chloration est opérée avant la distribution de l'eau sur le réseau.

Tableau V.7: Paramètres microbiologiques des eaux souterraines de la carte Modave-Clavier

Unité hydrogéologique			Aquifère des calcaires du Carbonifère						Aquifère des grès du Famennien
Paramètre	Unité	Niveau-guide	Jamagne (VIVAQUA)	Limet (CILE)	Galeries de Modave (VIVAQUA)	La Vanne (CIESAC)	Château de Bouillon (VIVAQUA)	Galerie Principale - Néblon (CILE)	Bois de Bassin P1 (AIEC)
		Code de l'Eau	07/03/2012	06/11/2013	05/06/2014	02/04/2014	05/06/2014	07/07/2014	18/10/2010
Germes totaux à 22°C	nbre / ml	-	2	5	0	9	1	3	16
Germes totaux à 37°C	nbre / ml	-	-	1	-	-	-	0	-
Coliformes totaux	nbre / 100 ml	0	0	5	0	7	0	12	0
Coliformes fécaux	nbre / 100 ml	0	-	-	-	-	-	-	-
Escherichia coli	nbre / 100 ml	0	0	0	0	1	0	0	0
Entérocoques fécaux	nbre / 100 ml	0	0	0	0	0	0	0	0
Clostridium perfringens	nbre / 100 ml	0	-	0	-	-	-	0	-

V.4. PESTICIDES

La présence de pesticides dans les eaux potabilisables devient, au même titre que les nitrates, relativement préoccupante. Depuis plusieurs années, une centaine de pesticides sont recherchés dans les eaux souterraines destinées à la consommation humaine. Les herbicides font partie des micropolluants les plus problématiques, qu'ils soient d'usage agricole ou non agricole, dans le sens où ils impliquent des traitements de potabilisation spécifiques et parfois très coûteux (SPW-DGO3, 2014; ICEW, 2012).

La figure V.8 montre l'impact des pesticides sur la qualité des eaux souterraines wallonnes. Cette carte illustre l'indicateur 'Pesticides dans les eaux souterraines (n°91)' de l'analyse des composantes de l'environnement présentée dans le rapport sur l'état de l'environnement wallon 'Les Indicateurs clés de l'Environnement Wallon 2012' (ICEW, 2012). Cet indicateur rend compte de manière simplifiée et globale de la qualité des eaux souterraines wallonnes par

rapport aux pesticides. Les indices⁹ de qualité révèlent que les aquifères investigués de la région de Modave-Clavier sont classés en catégorie 'Bonne' pour l'altération 'Pesticides'.

IMPACT DES PRODUITS PHYTOPHARMACEUTIQUES SUR LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES

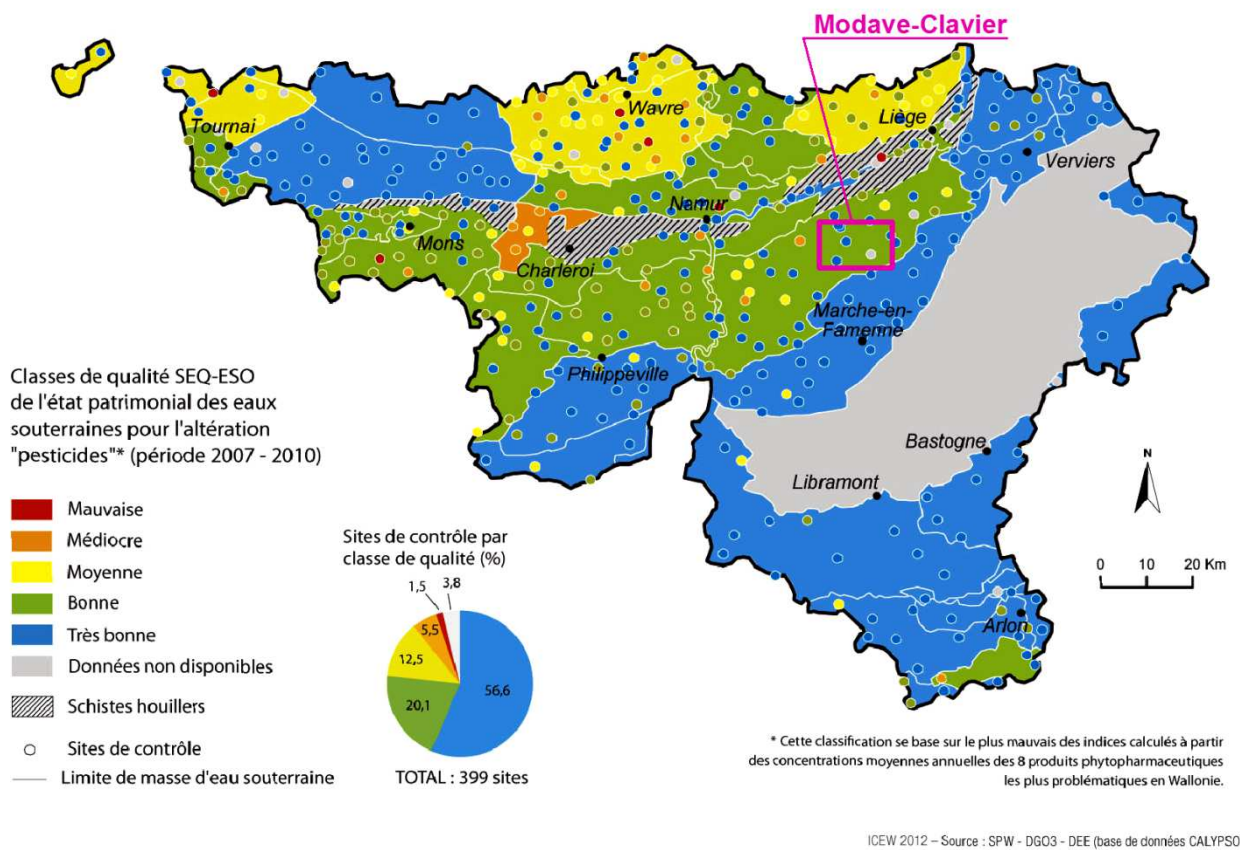


Figure V.8: Pesticides en Région wallonne (ICEW, 2012; carte 19 modifiée)

D'après les données disponibles, à ce jour, aucune contamination marquée des eaux souterraines par les pesticides n'est observée (tableau V.8). A l'instar des analyses microbiologiques, les analyses sur les pesticides concernent généralement les eaux captées par les ouvrages publics et destinées à la distribution. Les concentrations, par produit ou pour l'ensemble des pesticides, restent largement sous la norme de potabilité. Les valeurs maximales admises par le Code de l'Eau pour la plupart de ces produits phytosanitaires (ici, essentiellement des herbicides) sont de 100 ng/l. Cinq types de pesticides sont systématiquement recherchés lors des analyses spécifiques: l'atrazine et son métabolite, le déséthyl-atrazine, la simazine, le diuron et l'isoproturon. Des traces d'atrazine et de ses produits de dégradation (déséthylatrazine), ainsi que de bentazone, d'isoproturon et de 2,6-dichlorobenzamide ont été occasionnellement observées dans les eaux souterraines de la carte Modave-Clavier. Des nouvelles dispositions réglementaires, en lien avec les produits phytopharmaceutiques, sont entrées en vigueur le 1^{er} juin 2015. La phytolice¹⁰, nouveau certificat portant sur les connaissances des utilisateurs professionnels de produits

⁹ Indice calculé à partir des concentrations moyennes annuelles en atrazine, déséthylatrazine, simazine, diuron, isoproturon, chlortoluron, bromacile, bentazone et 2,6-dichlorobenzamide (BAM)

¹⁰ Information disponible sur http://agriculture.wallonie.be/pwrp/programme_resume.pdf & www.phytolice.be

phytopharmaceutiques, sera obligatoire dès novembre 2015. Ces mesures devraient contribuer à moyen et à long terme à la réduction des pesticides dans les eaux souterraines.

Tableau V.8: Principaux pesticides analysés dans les eaux souterraines de la carte Modave-Clavier

Unité hydrogéologique		Aquifère des calcaires du Carbonifère					
Pesticide	Niveau-guide	Limet (CILE)	Galeries de Modave (VIVAQUA)	La Vanne (CIESAC)	Château de Bouillon (VIVAQUA)	Fond Saint Martin (CIESAC)	Galerie Principale - Néblon (CILE)
	Code de l'eau	09/10/2013	05/06/2014	02/04/2014	05/06/2014	02/04/2014	07/07/2014
Atrazine (ng/l)	100	5	<10	6,5	<10	12,9	8
Déséthyl Atrazine (ng/l)	100	5	<10	18,5	<10	47,5	26
Simazine (ng/l)	100	<1	<10	<1	<10	<1	-
Diuron (ng/l)	100	<1	<10	<2	<10	<1	-
Isoproturon (ng/l)	100	<1	<10	2,8	<10	1,6	-
Chlortoluron (ng/l)	100	<1	<10	<1	<10	<1	-
Bromacile (ng/l)	100	<1	<10	<1	<10	<1	-
Bentazone (ng/l)	100	<1	<10	6,7	<10	23,9	-
2,6-dichlorobenzamide (BAM) (ng/l)	200	<2	<20	2,2	<20	<1	-

VI. EXPLOITATION DES AQUIFERES

Occupant presque les deux tiers de la superficie de la carte Modave-Clavier, l'aquifère des calcaires du Carbonifère (inclus l'unité hydrogéologique de l'Hastarien) est logiquement la première ressource en eau souterraine de la région étudiée. Plus de la moitié de la quarantaine de prises d'eau en activité sollicitent cette unité hydrogéologique. D'autres captages prélèvent dans l'aquifère des grès du Famennien et dans l'aquiclude à niveaux aquifères du Houiller.

Les eaux souterraines de la carte Modave-Clavier sont exploitées par des ouvrages appartenant à plusieurs compagnies de distribution publique d'eau potable mais aussi à des privés (agriculteurs et particuliers). Quelques puits (pompage fermier) sont mis à disposition des agriculteurs par les administrations communales (Ouffet et Durbuy).

Les données présentées dans ce chapitre ne concernent que les prises d'eau situées en Wallonie. Elles sont extraites de la base de données du Service Public de Wallonie. Malheureusement, l'encodage des volumes d'eau prélevés n'est pas complet. Ceci concerne principalement les petits exploitants et donc les petits volumes (< 3000 m³/an). Les puits des particuliers et des agriculteurs ne sont pas tous pourvus d'un compteur.

Sur la carte thématique intitulée "Carte des volumes d'eau prélevés", les volumes sont classés selon différentes catégories : les prélèvements d'eau destinés à la distribution publique d'eau potable (pastilles rouges) et les prélèvements à usage privé¹¹ (pastilles vertes). Les volumes présentés sont des volumes de l'année 2014 pour les ouvrages de distribution publique d'eau et de 2012 pour les "autres volumes". Sur cette même carte, sont aussi reportés les volumes moyens sur cinq ans, ici 2008-2012. Ils illustrent de manière plus réaliste l'exploitation des eaux souterraines sur la carte étudiée. Ces valeurs moyennes ne sont pas représentatives du potentiel d'exploitation ni de l'exploitation réelle des nappes. Elles reflètent simplement l'importance d'un site d'exploitation pendant les cinq années considérées. Parmi ces dernières, il se peut que certaines d'entre elles soient des années sans prélèvement.

Prélèvements destinés à la distribution publique d'eau potable

Le volume moyen prélevé pour la distribution publique est de l'ordre de 30×10⁶ m³ par an. En 2012, il était de 26,2×10⁶ m³ contre environ 38 000 m³ pour la catégorie 'Autres volumes'. L'essentiel de cet important volume quitte le bassin hydrologique d'où il est issu. En effet, les eaux prélevées par VIVAQUA sont exportées vers Bruxelles et sa région. Les eaux prélevées par les autres compagnies d'eau sont destinées à la population de la région environnant le captage, qui s'étend généralement à l'intérieur des limites du bassin.

¹¹ La catégorie "Autres volumes" regroupe les volumes à usage privé, c'est-à-dire les prélèvements des particuliers, des agriculteurs, des industries... tout prélèvement d'eau souterraine qui n'est pas destinée à la distribution publique d'eau potable.

VIVAQUA exploite trois sites de captage sur la carte Modave-Clavier (Figure VI.1). Tous sollicitent les eaux logées dans les calcaires du Carbonifère. Le captage de *Modave* est constitué d'un ensemble de galeries interconnectées et de quelques drains. Il s'agit du plus gros captage d'eau souterraine de la carte Modave-Clavier et de la Wallonie. Le volume exploité varie, annuellement, entre 55 000 m³/jour et 74 000 m³/jour (période 2000-2014). En 2014, 25×10⁶ m³ ont été prélevés. Le débit annuel varie en fonction des périodes de hautes ou de basses eaux. Les déversements de trop-plein d'eau sont déversés dans le Hoyoux.

Au droit du synclinal faillé de Marchin, VIVAQUA exploite la source de *Jamagne* dont sont extraits en moyenne 2,6×10⁶ m³ par an, soit environ 7100 m³/jour.

Au sud de la carte, sur la commune d'Havelange, VIVAQUA sollicite l'aquifère des calcaires du Carbonifère via une galerie drainante 'Château de Bouillon'. Annuellement, un volume moyen de 2,2×10⁶ m³ est prélevé, soit environ 6000 m³/jour.

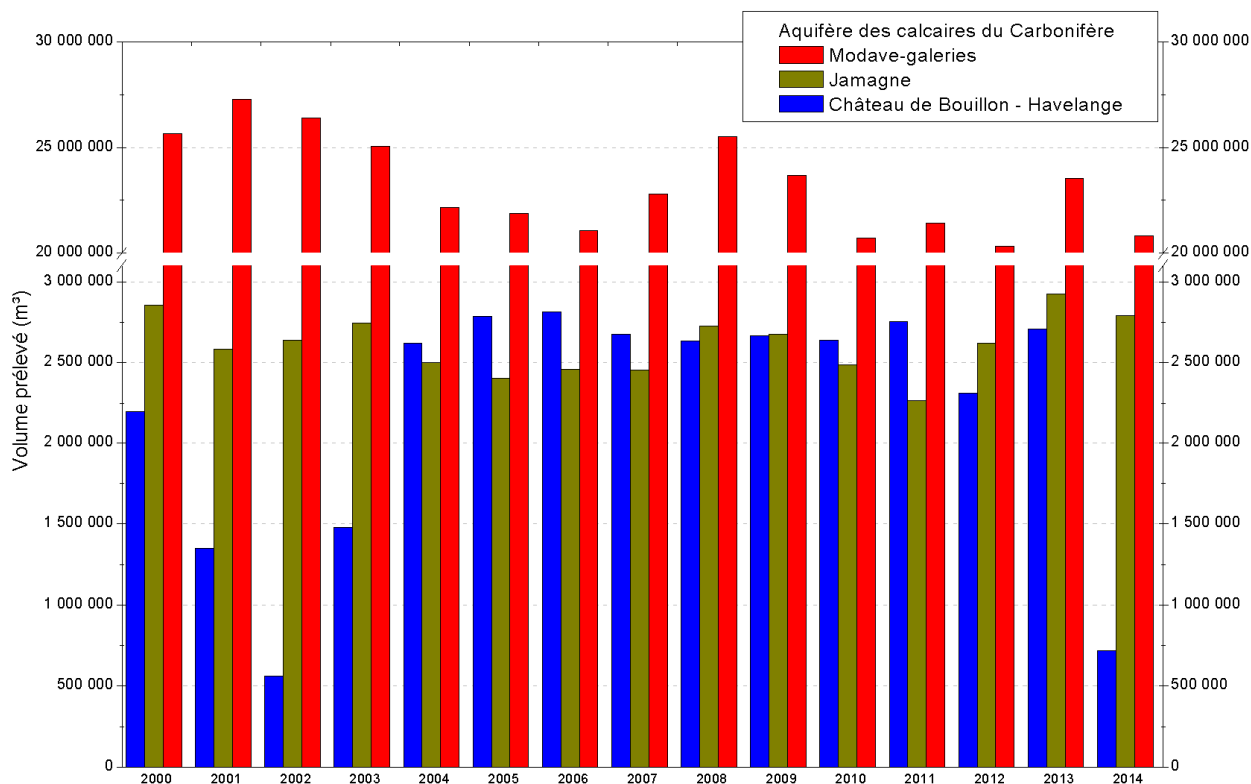


Figure VI.1: Volumes prélevés par VIVAQUA - Aquifère des calcaires du Carbonifère - Modave-Clavier

La CIESAC possède trois sites de captage situés sur le territoire de la carte Modave-Clavier. Tous exploitent l'aquifère des calcaires du Carbonifère (Figure VI.2). La prise d'eau 'La Vanne' (galerie), (avec celle 'Grand Avin', mise en réserve) prélève, en moyenne, environ 96 000 m³ par an, soit 260 m³/jour. Plus au sud, toujours dans la vallée du Hoyoux, le captage de *Petit Avin* (Pré à la Fontaine, source) sollicite la nappe à raison de 320 000 m³ par an, soit environ 875 m³/jour.

Dans la vallée du Néblon, la source à l'émergence '*Fond Saint-Martin*' draine la nappe logée dans les calcaires carbonifères. Annuellement, un volume moyen annuel d'environ 54 000 m³ est prélevé, soit 150 m³/jour.

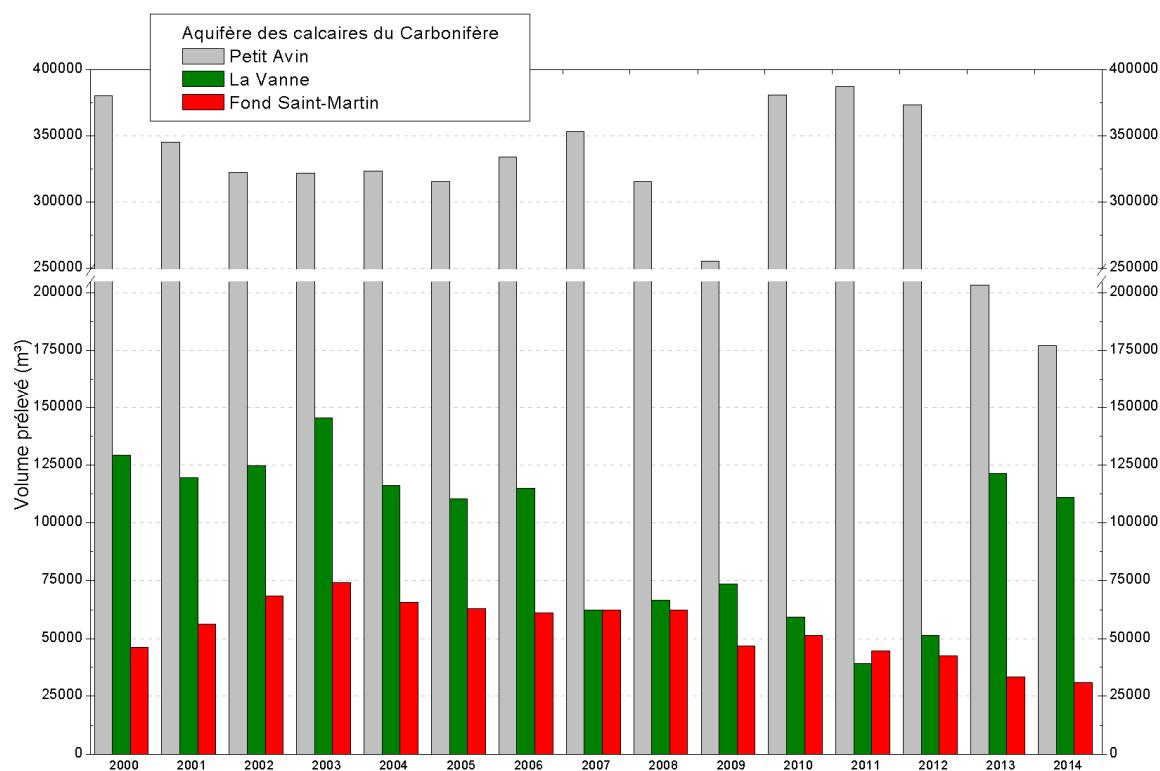


Figure VI.2: Volumes prélevés par la CIESAC - Aquifère des calcaires du Carbonifère - Modave-Clavier

L'**AIEC** exploite les eaux souterraines de la carte Modave-Clavier au droit de deux sites de captages (Figure VI.3). Les puits '*Bois de Bassin*' sollicitent l'aquifère des grès du Famennien, tandis que la source d'*Haveligeoule* émerge des calcaires carbonifères (en aval de la galerie '*Château de Bouillon*' de VIVAQUA). Le volume pompé par les deux puits '*Bois de Bassin*' est de l'ordre de 100 000 m³ par an, soit 280 m³/jour. La source '*Haveligeoule*' exploite la nappe des calcaires à raison de 55 000 m³ par an, soit environ 150 m³/jour.

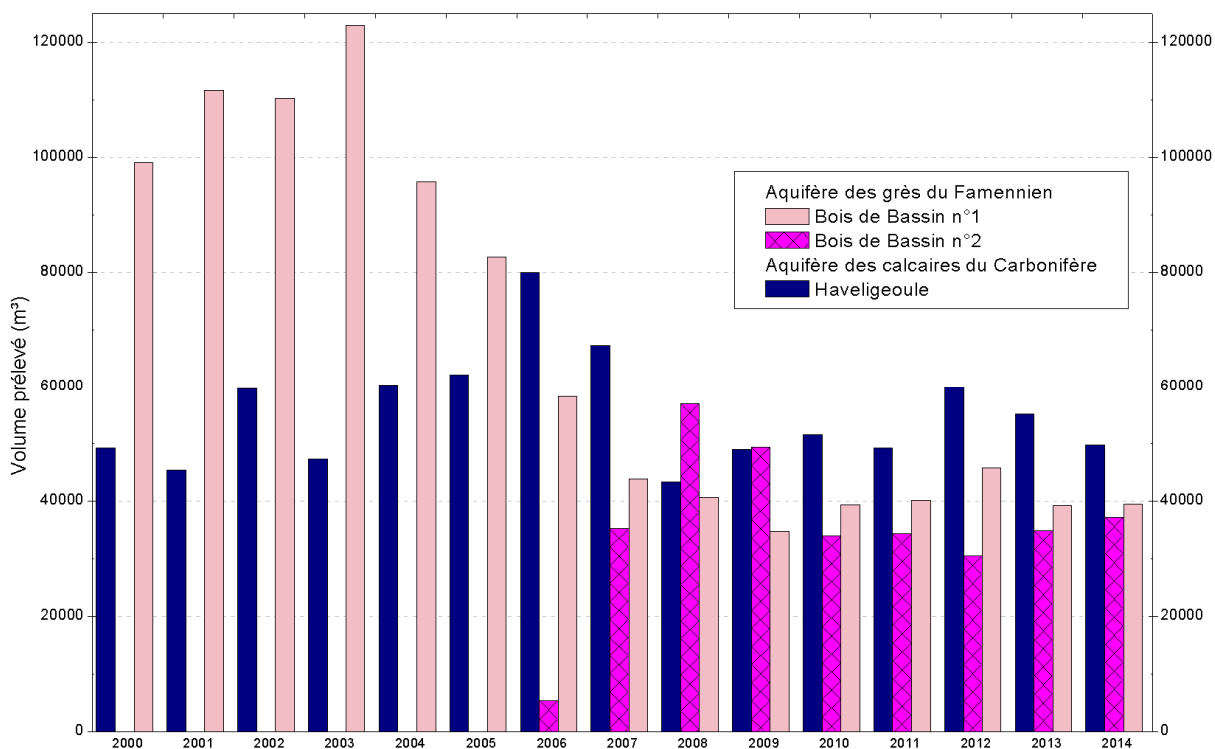


Figure VI.3: Volumes prélevés par l'AIEC - Aquifère des calcaires du Carbonifère & Aquifère des grès du Famennien - Modave-Clavier

Sur le territoire de la carte Modave-Clavier, la CILE possède la prise d'eau de *Limet Saint-Pierre* (bassin du Hoyoux). Le volume prélevé par cette galerie creusée à flanc de coteau est de l'ordre de 300 000 m³ par an, soit environ 820 m³/jour (Figure VI.4).

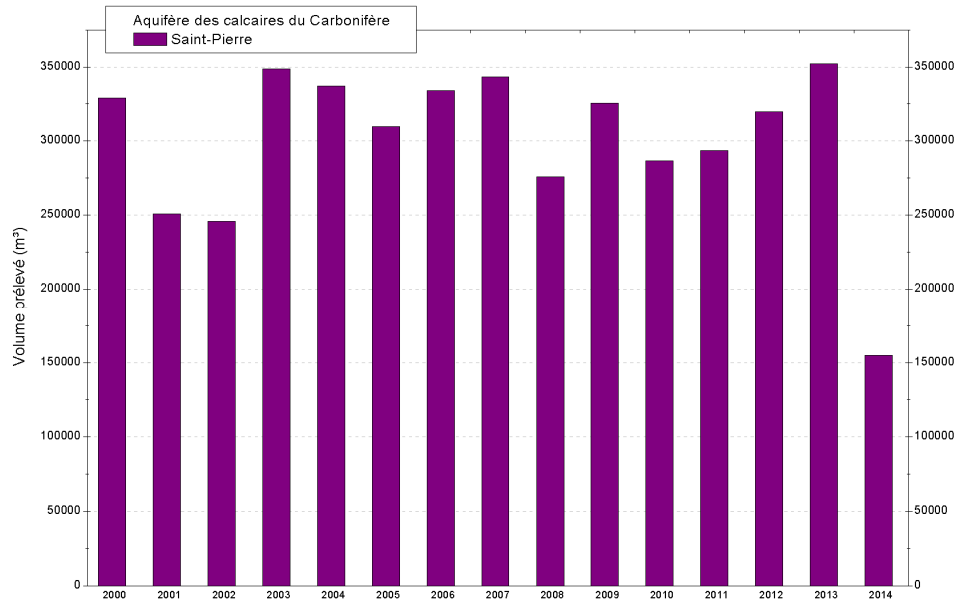


Figure VI.4: Volumes prélevés par la CILE - Aquifère des calcaires du Carbonifère - Modave-Clavier

A titre indicatif, deux importants captages se situent à proximité de la carte Modave-Clavier. Leur zone d'alimentation se situe partiellement sur la carte étudiée. Ainsi, la CILE exploite également l'aquifère des calcaires carbonifères du bassin du Néblon, via un réseau de galeries situées à environ 500 m à l'est de la carte étudiée (sur la carte Hamoir-Ferrières). Le volume moyen prélevé par ces galeries est de l'ordre de 10×10^6 m³ par an, soit environ 27 000 m³/jour.

Au sud de la carte Modave-Clavier, la SWDE exploite l'aquifère des grès du Famennien via la galerie 'Bois de Borlon' avec un prélèvement de l'ordre de 100 000 m³ par an, soit 275 m³/jour.

Autres prélèvements (industries, agriculteurs, particuliers)

Comparativement aux volumes prélevés pour l'approvisionnement public d'eau potable, les quantités d'eau prélevés par les privés (ou assimilés) sont négligeables. En moyenne, moins de 50 000 m³ sont prélevés annuellement par l'ensemble des ouvrages privés (contre 30 millions par la distribution publique d'eau). Ces captages sollicitent surtout l'aquifère des calcaires du Carbonifère, mais quelques-uns captent la nappe logée dans les grès du Famennien ou dans les horizons plus perméables de l'aquiclude à niveaux aquifères du Houiller.

Les volumes prélevés, à usage privé, sont peu importants. Ils varient entre 20 et 5000 m³/an, en moyenne (sur base des déclarations faites à l'administration). Ces prélèvements sont destinés à un usage domestique (sanitaires, jardin...), à des fins agricoles (alimentation du bétail, irrigation...). Les communes d'Ouffet et de Durbuy mettent, à disposition de leurs agriculteurs des points d'eau (pompages fermier).

VII. PARAMETRES D'ÉCOULEMENT ET DE TRANSPORT

L'objectif des tests sur le terrain (essais de pompage, tests d'injection, traçages...) est souvent de définir les caractéristiques hydrauliques de l'aquifère à l'aide de méthodes d'interprétation basées sur des solutions analytiques simplifiées ou sur la calibration de modèles numériques. Les principaux paramètres caractérisant l'écoulement d'eau souterraine et le transport de solutés sont respectivement, la conductivité hydraulique (K), le coefficient d'emmagasinement spécifique (S_s), la porosité effective (ou efficace) de drainage (n_e), la porosité effective de transport et la dispersivité longitudinale.

D'autres paramètres sont souvent cités dans les études consultées et parfois repris dans les notices des cartes:

- la transmissivité (T) exprime le débit d'eau qui s'écoule, pour une largeur unitaire, sur toute l'épaisseur d'un aquifère (de Marsily, 2004). Elle est l'intégration de la conductivité hydraulique (K) sur une épaisseur saturée donnée pour ramener le plus souvent l'écoulement à un processus 2D. Cette épaisseur est habituellement l'épaisseur totale de l'aquifère s'il s'agit d'un aquifère captif, et la hauteur d'eau saturée (très variable) s'il s'agit d'un aquifère libre.
- le coefficient d'emmagasinement est également une grandeur 2D intégrant le coefficient d'emmagasinement spécifique sur l'épaisseur de l'aquifère pour les nappes captives. Pour les nappes libres, le coefficient d'emmagasinement peut être approximé par la porosité effective (ou efficace) de drainage (n_e).

Vu la multitude et la complexité des méthodes et concepts utilisés pour leur définition et leur détermination, la description détaillée de ces notions sort du cadre de cette notice. Nous invitons le lecteur à consulter le site Internet de la carte hydrogéologique de Wallonie (<http://environnement.wallonie.be/cartosig/cartehydrogeo/concepts.htm>). Les concepts majeurs de l'hydrogéologie y sont abordés de manière simplifiée et quelques références bibliographiques y sont renseignées.

Les valeurs des paramètres peuvent varier suivant les échelles d'investigation. On parlera de valeurs à l'échelle macroscopique pour les essais réalisés sur échantillons en laboratoire, par comparaison aux valeurs à l'échelle mégascopique relatives aux zones investiguées lors d'essais menés sur le terrain. A titre indicatif, les tableaux VII.1 et VII.2 présentent quelques valeurs de conductivité hydraulique selon le type de terrain (roche meuble ou indurée, lithologie, degré de fissuration...).

Tableau VII.1: Valeurs du coefficient de perméabilité en fonction de la granulométrie (Castany, 1998)

K en m/s	10	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}
Granulométrie homogène	gravier pur			sable pur		sable très fin			limons		argile		
Granulométrie variée	gravier gros&moy		gravier et sable		sable et limons argileux								

Tableau VII.2: Intervalles de valeurs indicatives pour la conductivité hydraulique de différentes lithologies (échelles macroscopique & mégascopique) (Dassargues, 2010)

Lithologie		K (m/s)
Granites et Gneiss	avec fissures	$1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-4}$
	sans fissure	$1 \times 10^{-14} - 1 \times 10^{-10}$
Basaltes	avec fissures	$1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-3}$
	sans fissure	$1 \times 10^{-12} - 1 \times 10^{-9}$
Quartzites	avec fissures	$1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-4}$
	sans fissure	$1 \times 10^{-12} - 1 \times 10^{-9}$
Shales (argilites)		$1 \times 10^{-13} - 1 \times 10^{-9}$
Schistes (argilites schistosées)		$1 \times 10^{-9} - 1 \times 10^{-5}$
Calcaires	karstifiés	$1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-1}$
	avec fissures	$1 \times 10^{-9} - 1 \times 10^{-3}$
	sans fissure	$1 \times 10^{-12} - 1 \times 10^{-9}$
Grès	avec fissures	$1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-3}$
	sans fissure	$1 \times 10^{-9} - 1 \times 10^{-5}$
Craies		$1 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-3}$
Tufs volcaniques		$1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-3}$
Graviers		$1 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-1}$
Sables		$1 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-2}$
Silts, limons		$1 \times 10^{-9} - 1 \times 10^{-4}$
Argiles et limons		$1 \times 10^{-13} - 1 \times 10^{-7}$

Le sous-sol, constitué de terrains meubles ou de roches consolidées, peut aussi être caractérisé par ses porosités. Pour l'écoulement des eaux souterraines, seule la porosité effective (ou efficace) de drainage (n_e), est considérée car sa valeur tient lieu de coefficient d'emménagement en nappe libre. A titre indicatif, le tableau VII.3 reprend quelques intervalles de valeurs de porosité totale et porosité effective de drainage (n_e) en fonction du type de roches. Comme pour la conductivité hydraulique, ce paramètre est dépendant de l'échelle d'investigation (laboratoire – terrain).

Tableau VII.3: Intervalles de valeurs indicatives pour la porosité (n) et la porosité effective de drainage (n_e) de différentes lithologies (échelles macroscopique & mégascopique) (Dassargues, 2010)

Lithologie	n (%)	n_e (%)
Granites et Gneiss	0,02 - 2	0,1 - 2*
Quartzites	0,5 - 2	0 - 2*
Shales (argilites)	0,1 - 7,5	0,1 - 1*
Schistes (argilites schistosées)	0,1 - 7,5	0,1 - 2*
Calcaires et Dolomies primaires	0,5 - 15	0,1 - 14*
Dolomies secondaires	10 - 30	5 - 15*
Craies	0,5 - 45	0,5 - 15*
Grès, Psammites	3 - 38	3 - 25
Tufs volcaniques	30 - 40	5 - 15
Graviers	15 - 25	5 - 25
Sables	15 - 35	5 - 25
Silts	30 - 45	5 - 15
Argiles et limons	40 - 70	0,1 - 3

*dépendante de la fissuration

De nombreuses données hydrodynamiques sont généralement collectées lors des études des zones de prévention des prises d'eau publiques. Etant donné que la majorité des captages publics de la carte Modave-Clavier sollicitent les nappes logées dans les calcaires du Carbonifère, cette unité hydrogéologique fera essentiellement l'objet de ce chapitre. Quelques données sont, néanmoins, disponibles pour l'aquifère des grès du Famennien. Aucune donnée sur les paramètres hydrodynamiques des aquifères n'est disponible pour les autres unités hydrogéologiques de la carte Modave-Clavier.

Il est important de rappeler que les valeurs des paramètres d'écoulement et de transport calculés sont spécifiques à chaque site étudié et ne peuvent être extrapolés à l'ensemble de l'aquifère.

La majorité des sites de captages publics localisés sur la carte Modave-Clavier ont fait l'objet d'études hydrogéologiques substantielles (Figure VII.1). Dans le cadre de la caractérisation hydrogéologique de la masse d'eau RWM021, des investigations ont également été menées. Les principaux résultats de toutes ces études sont présentés ci-dessous.

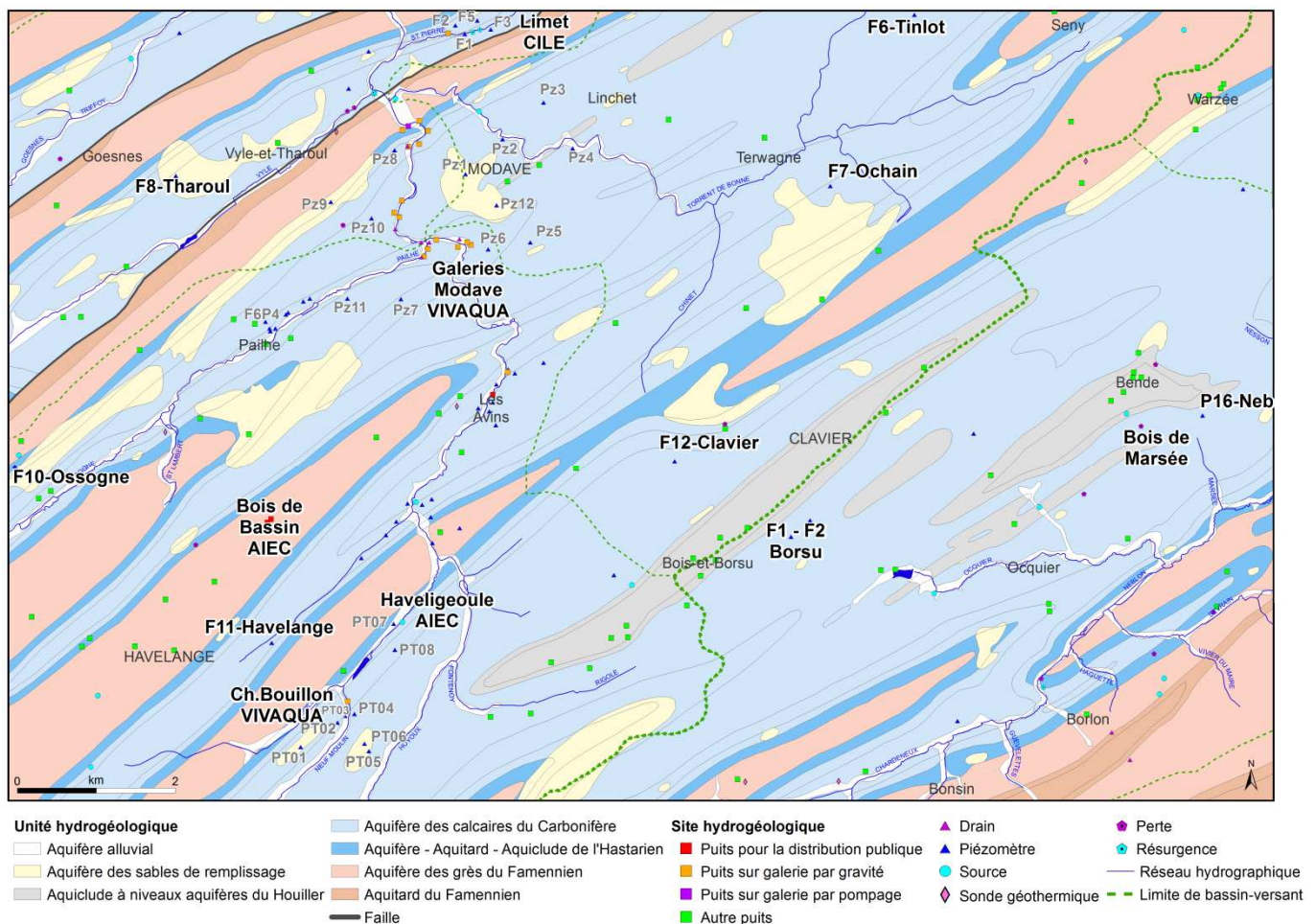


Figure VII.1: Localisation des sites avec des tests de pompages et/ou traçages sur la carte Modave-Clavier

Aquifère des calcaires du Carbonifère

Plusieurs forages ont été réalisés lors du projet Synclin'Eau (Brouyère et al, 2009), six sont localisés sur le territoire de la carte Modave-Clavier. Des essais de pompage, par paliers de 2 h avec remontée (2 h), y ont été menés à l'automne 2008 (Tableau VII.4). Les valeurs de conductivité hydraulique, calculée en considérant une épaisseur d'aquifère de 100 m, varient fortement, entre 10^{-4} et 10^{-8} m/s. Cela reflète la grande hétérogénéité des aquifères calcaires.

Tableau VII.4: Caractéristiques des essais de pompage - Valeurs des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère des calcaires du Carbonifère – Forages Synclin'Eau (GEOLYS, 2008)

Piézomètre	Profondeur du forage	Date	Débits des paliers (Q ₁ -Q ₂ -Q ₃)	Transmissivité T en rabattement et en remontée	Conductivité hydraulique K
F6-Tinlot	75 m (équipé jusque 65 m)	8 sept 2008	5,1-10,9-15,75 m ³ /h	Rab.: $1,9 \times 10^{-2}$ à $2,2 \times 10^{-2}$ m ² /s Remontée: $2,99 \times 10^{-2}$ m ² /s	$\approx 10^{-4}$ m/s
F7-Ochain	60 m	10 sept 2008	4,6-11,9-15,2 m ³ /h	Rab.: $1,05 \times 10^{-3}$ à $5,8 \times 10^{-4}$ m ² /s Remontée: 8×10^{-4} m ² /s	$\approx 10^{-8}$ m/s
F8-Tharoul	78 m (équipé jusque 75 m)	26 sept 2008	2,2-4,1-5,98 m ³ /h	Rab.: $4,20 \times 10^{-4}$ à $3,1 \times 10^{-4}$ m ² /s Remontée: $1,32 \times 10^{-4}$ m ² /s	$\approx 10^{-6}$ m/s
F10-Ossogne	70 m (équipé jusque 68 m)	8 oct 2008	4,6-10,3-15,8 m ³ /h	Rab.: $3,39 \times 10^{-3}$ à $3,25 \times 10^{-3}$ m ² /s Remontée: $2,37 \times 10^{-3}$ m ² /s	$\approx 10^{-5}$ m/s
F11-Havelange	52 m (équipé jusque 48,4 m)	15 sept 2008	7-15,1-19,7 m ³ /h	Rab.: $9,50 \times 10^{-3}$ à 11×10^{-3} m ² /s Remontée: $7,29 \times 10^{-3}$ m ² /s	$\approx 10^{-4}$ à 10^{-5} m/s
F12-Clavier	54 m (équipé jusque 53 m)	22 sept 2008	5,8-11,3-14,3 m ³ /h	Rab.: $7,40 \times 10^{-4}$ à $5,29 \times 10^{-4}$ m ² /s Remontée: $6,74 \times 10^{-4}$ m ² /s	$\approx 10^{-6}$ m/s

Dans la partie orientale du synclinal de Vyle-et-Tharoul, le captage de Limet (CILE) a été étudié au début des années 2000 (LGIH, 2000, 2001; 2002). Cinq piézomètres, dont quatre sont situés sur la carte étudiée, ont été forés. En février 2001, les essais de pompage (par paliers et longue durée, avec remontée) ont permis de définir les paramètres d'écoulement de la nappe des calcaires carbonifères au droit du site (Tableau VII.5). Pour les forages F1 et F5, les essais ont été interprétés par la méthode de Porchet. Pour les forages F2 et F3, l'interprétation des essais s'est faite à l'aide des équations de Dupuit (régime permanent) et Theis-Jacob (régime transitoire). Les valeurs obtenues montrent d'importants contrastes d'un puits à l'autre, avec des zones où les calcaires sont faiblement fissurés (F1, F3, F5) et des zones où les calcaires sont davantage fracturés (F2). D'ailleurs, ces interprétations sont confirmées par les résultats des traçages (avril 2001). Seul le traceur injecté au F2 a été détecté au captage. Les autres traceurs, injectés en F1 et F3, n'ont été détectés ni au captage, ni dans le ruisseau St-Pierre, ni dans le Hoyoux. Sur base du temps d'arrivée et de la distance entre F2 et le captage, les vitesses maximale et modale ont été déterminées, respectivement, à 44,6 m/h et 21,8 m/h.

Tableau VII.5: Caractéristiques des essais de pompage - Valeurs des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère des calcaires du Carbonifère – Site de Limet CILE (LGIH, 2001; 2002)

Piézomètre	Débits des paliers	Débit 'longue durée'	Conductivité hydraulique K
F1	-	1 m ³ /h	$0,85 \times 10^{-7}$ à $1,74 \times 10^{-7}$ m/s
F2	10-14,5-18 m ³ /h	18 m ³ /h	$1,75 \times 10^{-5}$ à $1,82 \times 10^{-5}$ m/s
F3	1-2-3,3-3,6 m ³ /h	3,3 m ³ /h	$1,4 \times 10^{-6}$ m/s
F5	2-2,5 m ³ /h (remontée entre les essais)		4×10^{-7} à 7×10^{-7} m/s

Plusieurs études ont été réalisées afin de mieux connaître le fonctionnement hydrogéologique de la nappe alimentant les galeries de VIVAQUA à Modave. En 1998, des piézomètres ont été forés à Pailhe suivis d'un essai de traçage (LGIH, 1998). Il a permis, par interprétation

analytique d'estimer la conductivité hydraulique des calcaires à $3,9 \times 10^{-2}$ m/s, leur porosité effective de transport à 1 %, et leur dispersivité à 60 m (distance de traçage de 3 km). Ce traçage a été réalisé dans une zone fortement fissurée détectée par photographie aérienne et confirmée par prospection géophysique; la vitesse de migration maximale du traceur a été de 152 m/h et sa vitesse modale de 98 m/h. En juin 2003, un nouvel essai de traçage a été réalisé suivant un protocole similaire à celui de 1998 (F6P4 puits d'injection et échantillonnages dans les galeries). *La reproduction de l'essai de traçage réalisé en mars 1998 à partir du piézomètre F6P4 de Pailhe, ne permet ni d'infirmer ni de confirmer les résultats de cet essai. Les arrivées de traceur au point d'échantillonnage RV15 (puits d'accès aval de la galerie principale) pour les deux essais présentent une similitude. Par contre pour les autres points d'échantillonnages, les résultats des deux essais sont différents. Les conditions hydrogéologiques n'étaient pas les mêmes au cours des deux essais. Pendant l'essai de 2003, le niveau piézométrique est environ trois mètres plus haut que pendant l'essai de 1998. Il se peut donc que, pour l'essai de 2003, le traceur ait été plus dilué avant d'atteindre les galeries. De même, il se peut que des réseaux de fissures et ou des conduits karstiques non activés au cours de l'essai de 1998 soient cette fois activés*(HGE-ULg, 2003).

En 2009, 12 piézomètres ont été forés, suivi d'essais de pompage et des traçages (GEOLYS, 2011). En aout et septembre 2009, des essais de pompage par paliers enchaînés avec suivi de la remontée finale et des essais 'longue durée' (24 h) avec suivi de la remontée ont été menés sur tous les ouvrages. Pour certains piézomètres, vu leur contexte géologique et hydrogéologique et les faibles débits (observés lors du forage), des Slug tests ont été réalisés. Les valeurs de conductivité hydrauliques calculées sont fournies dans le tableau VII.6. Pour les essais par Slug Test, la conductivité hydraulique (K) a été calculée selon les méthodes de Hvorslev et de Bouwer & Rice. Pour les autres puits, l'interprétation des essais de pompage a été faite par la méthode de Theis-Jacobs et la formule du Dupuit. Ces résultats montrent la grande variabilité de la conductivité hydraulique que peut présenter l'aquifère des calcaires du Carbonifère. On passe de zones à très faibles conductivités hydrauliques ($\approx 10^{-7}$ à 10^{-8} m/s) à des zones plus perméables ($\approx 10^{-4}$ m/s). Les premières zones sont composées de calcaires plus compacts, de remplissage sableux à charge argileuse ou marquées par la présence de shales ou de calcschistes. Les secondes présentent un bed-rock calcaire plus fracturé et fissuré (voire karstifié) avec un remplissage de nature plutôt sableuse. Entre les deux, on a des zones de perméabilités intermédiaires faiblement fracturées.

Tableau VII.6: Valeurs de conductivité hydraulique déduites des essais de pompage/slug tests – Piézomètres du site des galeries de Modave de VIVAQUA (GEOLYS, 2011)

Piézomètres Est	Pz 1	Pz 2	Pz 3	Pz 4	Pz 5	Pz 6	Pz 12
Type de test K pratique (m/s)	Pompage $4,24 \times 10^{-5}$	Pompage $1,30 \times 10^{-4}$	Slug test $3,2 \times 10^{-8}$	Pompage $1,13 \times 10^{-4}$	Slug test $5,6 \times 10^{-7}$	Pompage $1,46 \times 10^{-4}$	Pompage $4,67 \times 10^{-5}$
Piézomètres Ouest	Pz 7	Pz 8	Pz 9	Pz 10	Pz 11	K pratique: conductivité hydraulique "pratique" basée sur la colonne d'eau initiale réelle du puits selon la formule de Dupuit. Pour les slug tests, moyenne des 2 méthodes	
Type de test K pratique (m/s)	Pompage $1,28 \times 10^{-5}$	Pompage $1,14 \times 10^{-4}$	Slug test $4,8 \times 10^{-8}$	Slug test $3,9 \times 10^{-7}$	Slug test $6,0 \times 10^{-7}$		

La campagne de traçage a été menée en deux phases: partie aval du captage en juin 2011 et partie amont en septembre 2011 (GEOLYS, 2012). Un traceur fluorescent a été injecté en six lieux (Pz1-Pz6-Pz7-Pz8-karst)(Figure VII.2). Seize points répartis dans les galeries, dans le ruisseau de Pailhe et dans le Hoyoux ont été surveillés (échantillonneurs automatiques, fluorimètres, charbons actifs).

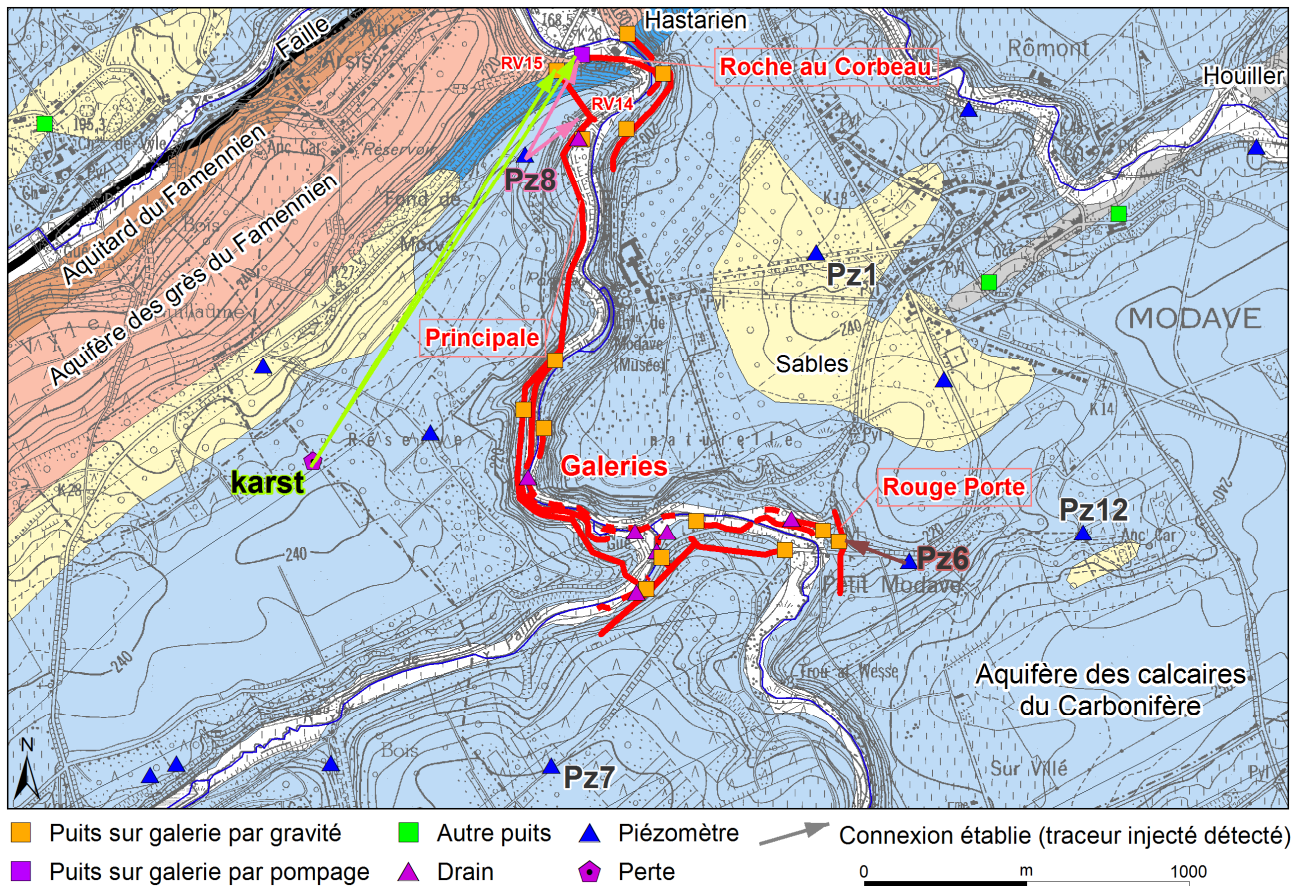


Figure VII.2: Localisation des points d'injection et de restitution - Traçages 2011 - Captages de Modave – VIVAQUA

Les traceurs injectés au droit de trois sites (Pz6, Pz8, karst) ont été observés à au moins un des points de restitution placés dans les galeries (au droit des chambres de visite)(Tableau VII.7 & Figure VII.2). Les différentes chambres étant connectées entre elles par les galeries drainantes, certaines restitutions détectées en aval l'ont probablement été aussi en amont (acheminement du traceur via les conduites). Dès lors les restitutions à ces points avals ne seront pas étudiées. Trois traceurs injectés au Pz1, Pz7 et Pz12 n'ont pas été détectés aux points d'échantillonnage des galeries drainantes. Pour l'ensemble des six injections, aucune restitution de traceur n'a été détectée dans les eaux de surface (Pailhe et Hoyoux). Cette non-détection ne signifie pas forcément non-arrivée. En effet, le débit des cours d'eau, la quantité de traceur, la distance, la méthode de mesure (charbon actif) sont autant de facteurs qui peuvent avoir masqués la restitution des traceurs.

Les valeurs de porosité effective de transport obtenues, par l'interprétation analytique des temps de première arrivée, sont très faibles (de $1,5$ à $6,0 \times 10^{-4}$), correspondant à des axes de fracturation avec liaison directe entre le point d'injection et le captage (GEOLYS, 2012).

Tableau VII.7: Caractéristiques et paramètres de l'essai de traçage du site des galeries VIVAQUA à Modave (d'après GEOLYS, 2012)

Zone	Point d'injection	Point de restitution	Distance (m)	Temps de 1 ^{ière} arrivée (h)	Temps modal (h) (pic de restitution)	Porosité effective de transport n_e (%)
Aval	Pz1	-	-	-	-	-
	Pz8	Principale (RV14-RV15)	100	2,9	11,4	0,0149
		Roche au Corbeau	450	21,33	51,8	0,0243
	karst	Principale (RV15)	1350	60,33	69,3	0,0229
		Roche au Corbeau	1600	189,33	189,33	0,0607
Amont	Pz6	Rouge Porte	200	4,88	12,9	0,0256
		Principale	-	-	-	-
	Pz7	-	-	-	-	-
	Pz12	-	-	-	-	-

Dans la partie occidentale de l'entité de Clavier (rive gauche du Hoyoux), à Havelange, des investigations ont été menées sur les sites de VIVAQUA (Château de Bouillon) et de l'AIEC (Haveligeoule). En 2004, huit piézomètres¹² ont été forés autour de ces captages (Figure VII.1). En janvier et février 2005, des essais de pompage par paliers enchaînés à débit croissant et avec suivi de la remontée finale ainsi que des essais 'longue durée' (24 h) avec suivi de la remontée ont été menés (BCG, 2005a). Les conductivités hydrauliques déduites des courbes de remontée se situent dans une gamme de valeurs s'étalant de 10^{-7} à 10^{-4} m/s. Ces valeurs témoignent d'un milieu plutôt hétérogène. Des grandes conductivités hydrauliques (10^{-4} m/s) sont mises en évidence pour les piézomètres PT02 et PT08. Des conductivités hydrauliques intermédiaires (10^{-6} à 10^{-5} m/s) sont caractéristiques des ouvrages PT04 et PT05. Les autres ouvrages (PT01, PT06 et PT07) sont caractérisés par des conductivités hydrauliques plutôt faibles (10^{-7} et 10^{-6} m/s). Une vidange rapide a été observée au PT07. Aucun des essais n'a montré d'influence sur des piézomètres voisins (CIBE-AIEC, 2006).

Des traçages ont aussi été réalisés dans sept des huit piézomètres, ainsi que directement dans le ruisseau de Neuf-Moulin à hauteur du PT03 (CIBE-AIEC, 2006). Les caractéristiques de ce test sont résumées dans le tableau VII.8. Les captages et les ruisseaux (Neuf Moulin et Bouillon) ont été surveillés (échantillonneur automatique et prélèvements manuels).

Tableau VII.8: Caractéristiques et paramètres des essais de traçage sur le site 'Château de Bouillon' de VIVAQUA et de Haveligeoule de l'AIEC à Havelange (d'après CIBE-AIEC, 2006)

Caractéristiques de l'essai de traçage				Résultats		Interprétation des résultats (modèle CATTI)	
Point d'injection	Point de restitution surveillé	Distance (m)	Date du test	Vitesse maximale d'arrivée (m/h)	Taux de restitution (%)	Porosité effective de transport (%)	Dispersivité longitudinale (m)
PT01	Château de Bouillon (VIVAQUA) Ruisseau de Neuf Moulin (aucun traceur détecté)	785	14/07/2005	Aucune détection au captage sur la période d'échantillonnage (→07/09/2005)			
PT02		240	14/07/2005	8	19,58	courbe non interprétable	
PT03		152	28/07/2004	6,6	36,68	5,5*	25*
PT04		124	14/07/2005	5,2	1,5	5*	12*
PT05		623	14/07/2005	Deux évènements isolés observés 30 et 42 jours après l'injection			
PT06		514	14/07/2005	Très faibles traces du traceur observées 4 jours après l'injection			
Ruisseau de Neuf Moulin	Château de Bouillon	≈ 150	14/07/2005	Aucune détection au captage sur la période d'échantillonnage (→07/09/2005)			
PT08	Haveligeoule (AIEC)	319	02/06/2004	13,3	< 1	courbe non interprétable	
	Ruis. de Bouillon	≈ 330		Restitution continue plus de 3 jours après injection (1 à 2 éch/jour)			

*épaisseur d'aquifère retenue: 8 m (h crépinée) (hypothèse: l'eau de la nappe située sous le niveau des piézomètres ne joue pas de rôle important dans le transport des traceurs)

¹² Le piézomètre PT03 a été rebouché le 8 septembre 2004, après l'essai de traçage.

Les principaux enseignements de ces tests de traçage sont

- une restitution nette des traceurs injectés aux PT02, PT03, PT04;
- une arrivée sporadique et minime des traceurs injectés aux PT5, PT6, PT08;
- pas de détection du traceur injecté au PT01 et dans le Neuf-Moulin;
- l'absence de détection ne signifie pas forcément la non-arrivée des traceurs (dilution trop grande, temps d'observation trop court);
- la vitesse d'arrivée des traceurs est suffisamment faible pour exclure la présence de conduits karstiques entre les piézomètres et les captages;
- les vitesses observées indiquent davantage un milieu fissuré;
- les valeurs de porosité effective de transport, calculées avec le programme CATTI, sont relativement élevées pour un aquifère de calcaires fissurés. Ainsi, ces valeurs sont à prendre avec précaution.

A Marsée, dans le bassin du Néblon, un essai de traçage a permis d'estimer, par formule analytique, la dispersivité des calcaires à 15 m (distance de traçage de 3 km). Ce traçage a été réalisé à partir de la perte de Marsée en direction des galeries captantes de la CILE. La vitesse maximale du traceur a été de 73 m/h et sa vitesse modale de 60 m/h (Meus, 1993).

En août 2008, un essai de traçage a été réalisé à partir de la perte diffuse de Bende, située au nord-est du synclinal houiller (Brouyère et al, 2009). Aucune restitution n'a été observée aux points d'échantillonnage placés dans les galeries du Néblon de la CILE ou dans le Néblon. L'hypothèse de non connexion hydrogéologique entre la perte et ces points ne semble pas vraisemblable. Cette non détection est davantage à imputer à une trop grande dilution du traceur vu les débits drainés par les galeries.

Entre ces pertes et les galeries du Néblon, se situe le piézomètre Pz16-Neb (Figure VII.1). Un essai de pompage a été réalisé dans ce piézomètre et a permis d'estimer la conductivité hydraulique du milieu à $1,2 \times 10^{-6}$ m/s (Gaule, 1998).

Des essais de pompage ont été réalisés dans des forages situés au sud de Bois-et-Borsu (LGIH, 1984). Forés au droit des calcaires carbonifères ces puits présentent de faibles conductivités hydrauliques (1×10^{-6} m/s pour le puits F1 et 5×10^{-6} m/s pour le forage F2).

Aquifère des grès du Famennien

Sur les hauteurs d'Havelange, l'AIEC possède deux puits implantés dans les grès du Famennien. Des essais de pompage ont permis de préciser la conductivité hydraulique de ces formations (LGIH, 1997a).

- pour P1 Bois de Bassin, une conductivité hydraulique de $1,4 \times 10^{-4}$ à $5,5 \times 10^{-6}$ m/s a été calculée ; elle diminue avec la profondeur;
- pour P2 Bois de Bassin, la conductivité hydraulique varie en cours de pompage de $1,9 \times 10^{-5}$ à 1×10^{-6} m/s; elle diminue avec la profondeur.

VIII. ZONES DE PROTECTION

VIII.1. CADRE LEGAL

Suite au développement économique, les ressources en eaux souterraines sont de plus en plus sollicitées et en même temps soumises à des pressions environnementales qui menacent leur qualité.

Afin de limiter les risques de contamination des captages, des périmètres de prévention doivent être mis en place. La législation wallonne¹³ définit quatre niveaux de protection à mesure que l'on s'éloigne du captage : zones de prise d'eau (Zone I), de prévention (Zones IIa et IIb) et de surveillance (Zone III).

1° Zone de prise d'eau ou zone I

La zone de prise d'eau est délimitée par la ligne située à 10 m des limites extérieures des installations en surface strictement nécessaires à la prise d'eau. A l'intérieur de la zone de prise d'eau, seules les activités en rapport direct avec la production d'eau sont tolérées.

2° Zones de prévention rapprochée et éloignée ou zones IIa et IIb

L'aire géographique dans laquelle le captage peut être atteint par tout polluant sans que celui-ci ne soit dégradé ou dissous de façon suffisante et sans qu'il ne soit possible de le récupérer de façon efficace, s'appelle la "zone de prévention".

Une zone de prévention est déterminée en nappe libre. En nappe captive, une telle zone peut être déterminée à la demande de l'exploitant ou imposée par les autorités régionales.

La zone de prévention d'une prise d'eau souterraine en nappe libre est scindée en deux sous-zones :

- La zone de prévention rapprochée (zone IIa) : zone comprise entre le périmètre de la zone I et une ligne située à une distance de l'ouvrage de prise d'eau correspondant à un temps de transfert de l'eau souterraine jusqu'à l'ouvrage égal à 24 heures dans le sol saturé.

A défaut de données suffisantes permettant de définir la zone IIa selon le critère des temps de transfert, la législation suggère de délimiter la zone IIa par une ligne située à une distance horizontale minimale de 35 mètres à partir des installations de surface, dans le cas d'un puits, et par deux lignes situées à 25 mètres au minimum de part et d'autre de la projection de surface de l'axe longitudinal dans le cas d'une galerie. En milieu karstique, tous les points préférentiels

¹³ Arrêté de l'Exécutif régional wallon du 14 novembre 1991 relatif aux prises d'eau souterraines, aux zones de prise d'eau, de prévention et de surveillance et à la recharge artificielle des nappes d'eau souterraine, abrogé par l'arrêté du GW du 3 mars 2005 relatif au livre II du code de l'Environnement, contenant le Code de l'eau (M.B. du 12/04/2005, p.15068)

de pénétration (dolines et pertes) dont la liaison avec le captage est établie sont classés en zone IIa.

- La zone de prévention éloignée (zone IIb) : zone comprise entre le périmètre extérieur de la zone IIa et le périmètre extérieur de la zone d'appel de la prise d'eau. Le périmètre extérieur de la zone d'appel de la zone IIb ne peut être situé à une distance de l'ouvrage supérieure à celle correspondant à un temps de transfert de l'eau souterraine jusqu'à l'ouvrage de prise d'eau égal à 50 jours dans le sol saturé.

A défaut de données suffisantes permettant la délimitation de la zone IIb suivant les principes définis ci-avant, le périmètre de cette zone est distant du périmètre extérieur de la zone IIa de:

- 100 mètres pour les formations aquifères sableuses ;
- 500 mètres pour les formations aquifères graveleuses ;
- 1000 mètres pour les formations aquifères fissurés ou karstiques

3° Zone de surveillance ou zone III

Une zone de surveillance peut être déterminée pour toute prise d'eau. Cette zone englobe l'entièreté du bassin hydrographique et du bassin hydrogéologique situés à l'amont du point de captage.

Les limites de ces zones peuvent coïncider avec des repères ou des limites topographiques naturels ou artificiels, rendant leur identification sur le terrain plus aisée.

Mesure de prévention

Diverses mesures de protection ont été définies par les autorités compétentes pour les différentes zones. Ces mesures concernent notamment l'utilisation et le stockage de produits dangereux, d'engrais ou de pesticides, les puits perdus, les nouveaux cimetières, les parkings,... Elles visent à réduire au maximum les risques de contamination de la nappe. Toutes ces mesures sont décrites aux articles R.162 à R.170 de l'Arrêté du Gouvernement Wallon du 12 février 2009¹⁴.

La Société publique de Gestion de l'Eau¹⁵ assure la gestion financière des dossiers concernant la protection des eaux probables distribuées par réseaux, par le biais de contrats de service passés avec les producteurs d'eau. Pour financer les recherches relatives à la délimitation des zones de prévention et indemniser tout particulier ou toute société dont les biens doivent être mis en conformité avec la législation, une redevance est prélevée sur chaque m³ fourni par les sociétés de distribution d'eau.

¹⁴ 12 février 2009 : AGW modifiant le livre II du Code de l'Environnement constituant les Codes de l'eau et ce qui concerne les prises d'eau souterraine, les zones de prises d'eau, de prévention et de surveillance (M.B. du 27/04/2009, p.33035)

¹⁵ SPGE, instituée par le décret du 15 avril 1999

La DGARNE met à la disposition du public un site internet où sont exposées les différentes étapes nécessaires à la détermination des zones de prévention et de surveillance en Région wallonne (<http://environnement.wallonie.be/de/eso/atlas>).

Un autre site a également été développé, permettant grâce à une recherche rapide par commune ou par producteur d'eau, de visualiser, soit la carte et le texte des zones officiellement désignées par arrêté ministériel, soit par carte de chaque zone actuellement soumise à l'enquête publique (http://environnement.wallonie.be/zones_prevention/).

VIII.2. ZONES DE PREVENTION DES CAPTAGES DE L'AIEC

L'AIEC possède deux captages toujours en activité sur la carte Modave-Clavier, dont les zones de prévention sont arrêtées par le Gouvernement wallon. Sur la combe d'Havelange, se trouvent les puits, P1 & P2, du Bois de Bassin, sollicitant l'aquifère des grès du Famennien. La délimitation de ces périmètres est basée sur une utilisation simple de la loi de Darcy, utilisant quelques paramètres hydrogéologiques (coefficient d'emmagasinement, conductivité hydraulique, gradient piézométrique...). La zone de prévention éloignée a été déterminée pour un débit de 10 m³/h sur le puits P1 et 20 m³/h sur le puits P2 (BCG, 2005b). Ce tracé préliminaire a été adapté aux limites cadastrales et urbanistiques (Figure VIII.1). Ces zones de prévention ont été arrêtées par le Ministre wallon en date du 1^{er} août 2011: *Arrêté ministériel relatif à l'établissement des zones de prévention rapprochée et éloignée des ouvrages de prise d'eau souterraine potabilisable dénommés Puits n° 1 Bois de Bassin et Puits n° 2 Bois de Bassin sis sur le territoire de la commune d'Havelange (M.B. 31.08.2011)*.

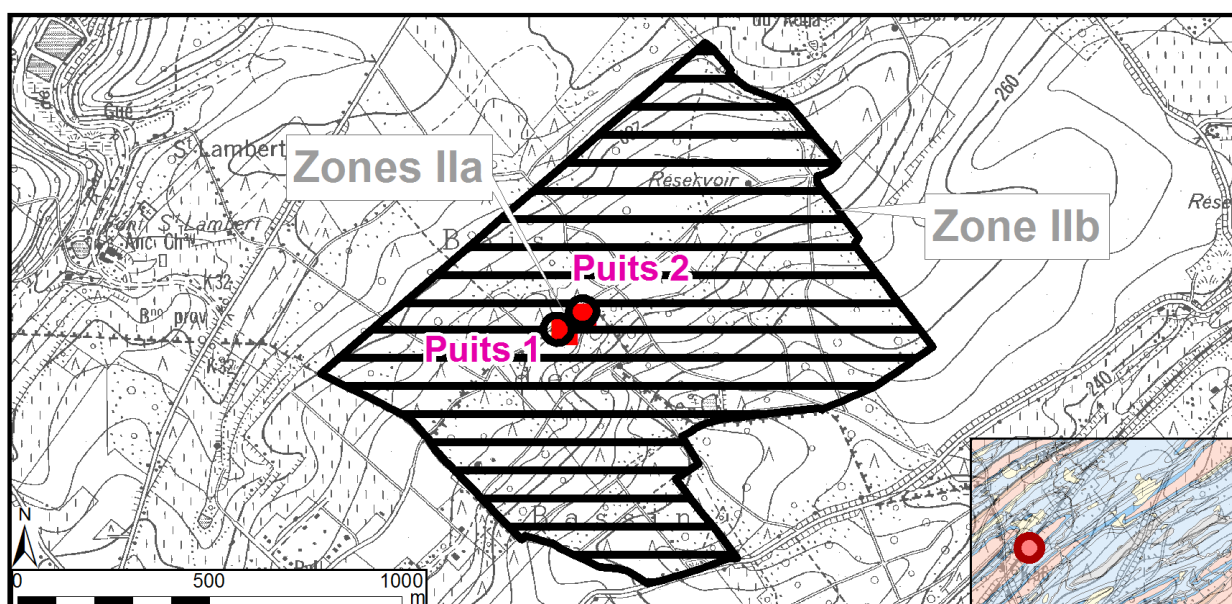


Figure VIII.1: Zones de prévention arrêtées autour des puits, P1 & P2, du Bois du Bassin – AIEC

Plus au sud, l'AIEC exploite l'aquifère des calcaires du Carbonifère via la source à l'émergence, Haveligeoule. La détermination des zones de prévention de ce captage a été réalisée conjointement avec l'étude du captage voisin, la galerie captante 'Château de Bouillon' de VIVAQUA. Une étude hydrogéologique exhaustive a été menée (forages, essais de pompage, traçages)(CIBE-AIEC, 2006). Elle a permis de délimiter les zones de prévention sur base des

temps de transfert. Par la suite, afin d'être repérable sur le terrain, ce tracé a été adapté aux limites cadastrales et urbanistiques (Figure VIII.2). Ces zones de prévention (code SPW: VIVAQUA022-AIEC15) ont été arrêtées par le Ministre wallon en date du 2 octobre 2008: *Arrêté ministériel relatif à l'établissement des zones de prévention rapprochée et éloignée des ouvrages de prise d'eau souterraine de catégorie B (potabilisable) dénommés Havelange (Château de Bouillon), sis sur le territoire de la commune d'Havelange et Haveligeoule, sis sur le territoire de la commune de Clavier (M.B. 14.11.2008).*

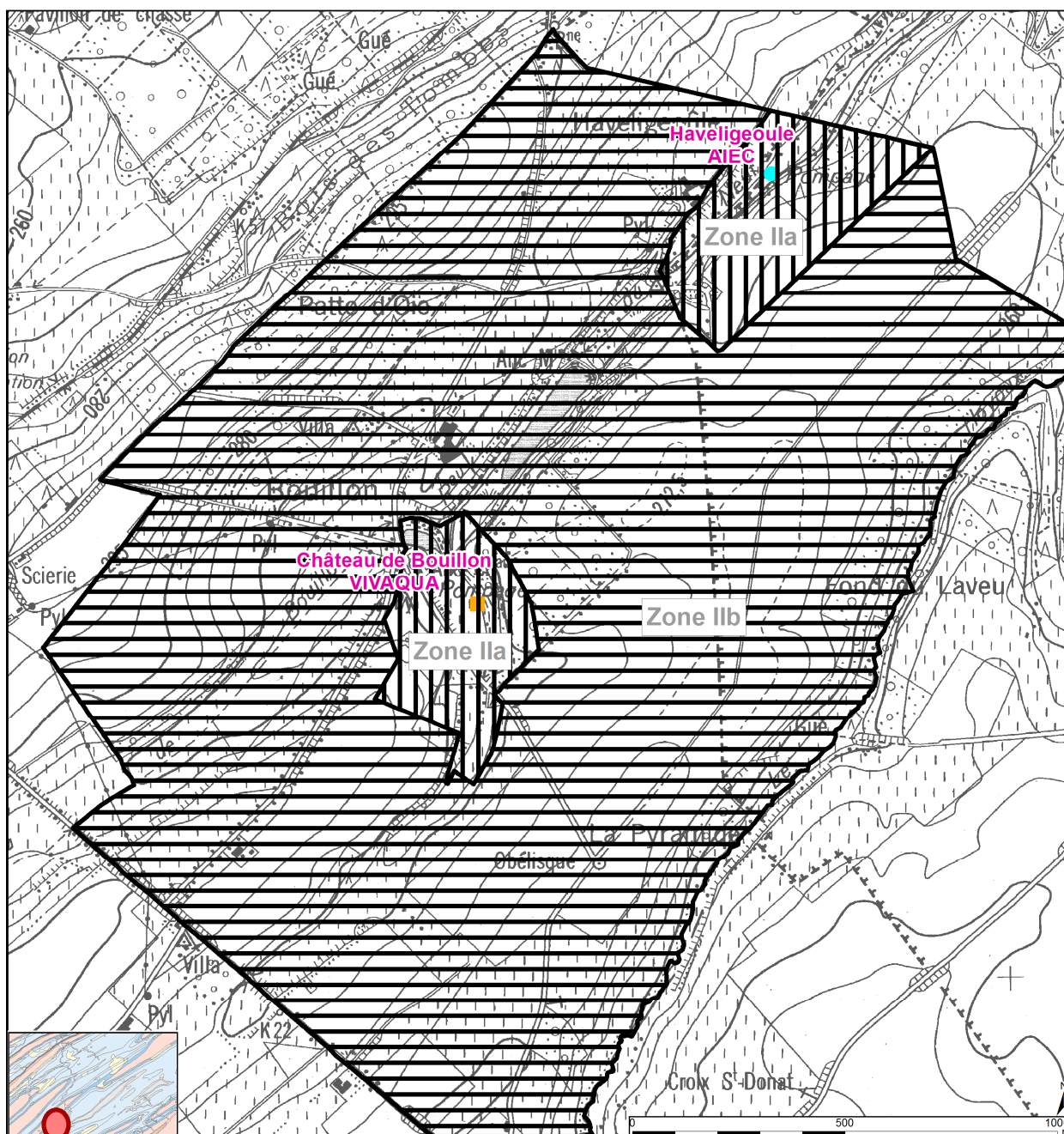


Figure VIII.2: Zones de prévention arrêtées autour des captages de Haveligeoule (AIEC) et de Château de Bouillon (VIVAQUA)

En bordure de la carte Maffe-Grandhan (au sud de Modave-Clavier), se trouve le captage de Bassinnes (54/4/1/002). Les zones de prévention de cette galerie ne sont pas encore définies. Cependant, il est très probable que leur périmètre déborde en partie sur la carte Modave-Clavier.

VIII.3. ZONES DE PREVENTION DES CAPTAGES LA CIESAC

La Compagnie Intercommunale des Eaux de la Sources de Les Avins groupe Clavier exploite trois sites de captage situés sur le territoire de la carte Modave-Clavier.

Les zones de prévention autour des prises d'eau La Vanne & Grand Avin (code SPW: CIESAC01; Figure VIII.3) et celles de la prise d'eau Petit Avin (code SPW: CIESAC02; Figure VIII.4) ont été établies pour des débits de 30 m³/h (La Vanne), 15 m³/h (Grand Avin) et 65 m³/h (Petit Avin), sur base du calcul des temps de transfert, ainsi que sur base des limites cadastrales et urbanistiques permettant le repérage des zones sur le terrain (étude AQUALE-ECOFOX, 2004). Ces zones de prévention ont été arrêtées par le Ministre wallon en date du 6 décembre 2007 (un seul texte pour les deux prises d'eau): *Arrêté ministériel relatif à l'établissement des zones de prévention rapprochée et éloignée des ouvrages de prise d'eau souterraine dénommés La Vanne, Petit Avin (Pré à la Fontaine), Grand Avin, sis sur le territoire de la commune de Clavier (M.B. 22.01.2008).*

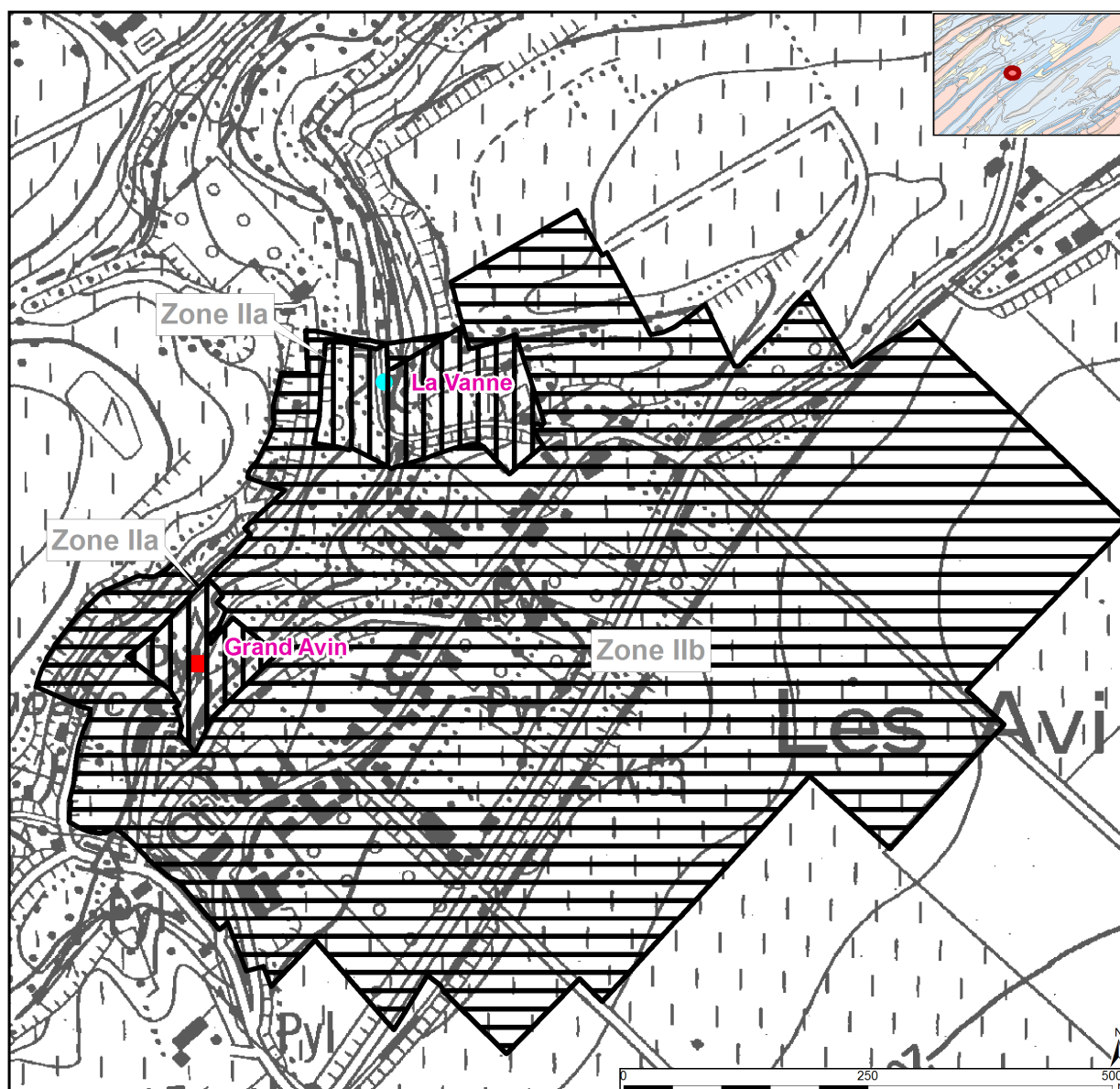


Figure VIII.3: Zones de prévention arrêtées autour des captages La Vanne & Grand Avin – CIESAC



Figure VIII.4: Zones de prévention arrêtées autour du captage Petit Avin – CIESAC

La CIESAC exploite également le captage Fond Saint-Martin à Vervoz. Les zones de prévention sont définies, sur base d'une étude hydrogéologique succincte (BCG, 2011). Le dossier est déposé à l'administration (SPW-DGO3). Les zones de prévention vont être mises à l'enquête publique (probablement à l'automne-hiver 2015). En attente de la délimitation officielle de ces zones, le symbole triangulaire 'Zone de prévention à définir' est utilisé sur la carte hydrogéologique principale (1/25.000). Il convient, dès lors, de se référer provisoirement aux distances fixes forfaitaires définies dans la législation soit :

- pour la zone IIa : une distance horizontale minimale de 35 mètres à partir des installations de surface, dans le cas d'un puits, et par deux lignes situées à 25 mètres au minimum de part et d'autre de la projection en surface de l'axe longitudinal dans le cas d'une galerie;
- pour la zone IIb : une distance horizontale 1 000 mètres.

La localisation de cette zone de prévention est reprise sur la figure VIII.5.

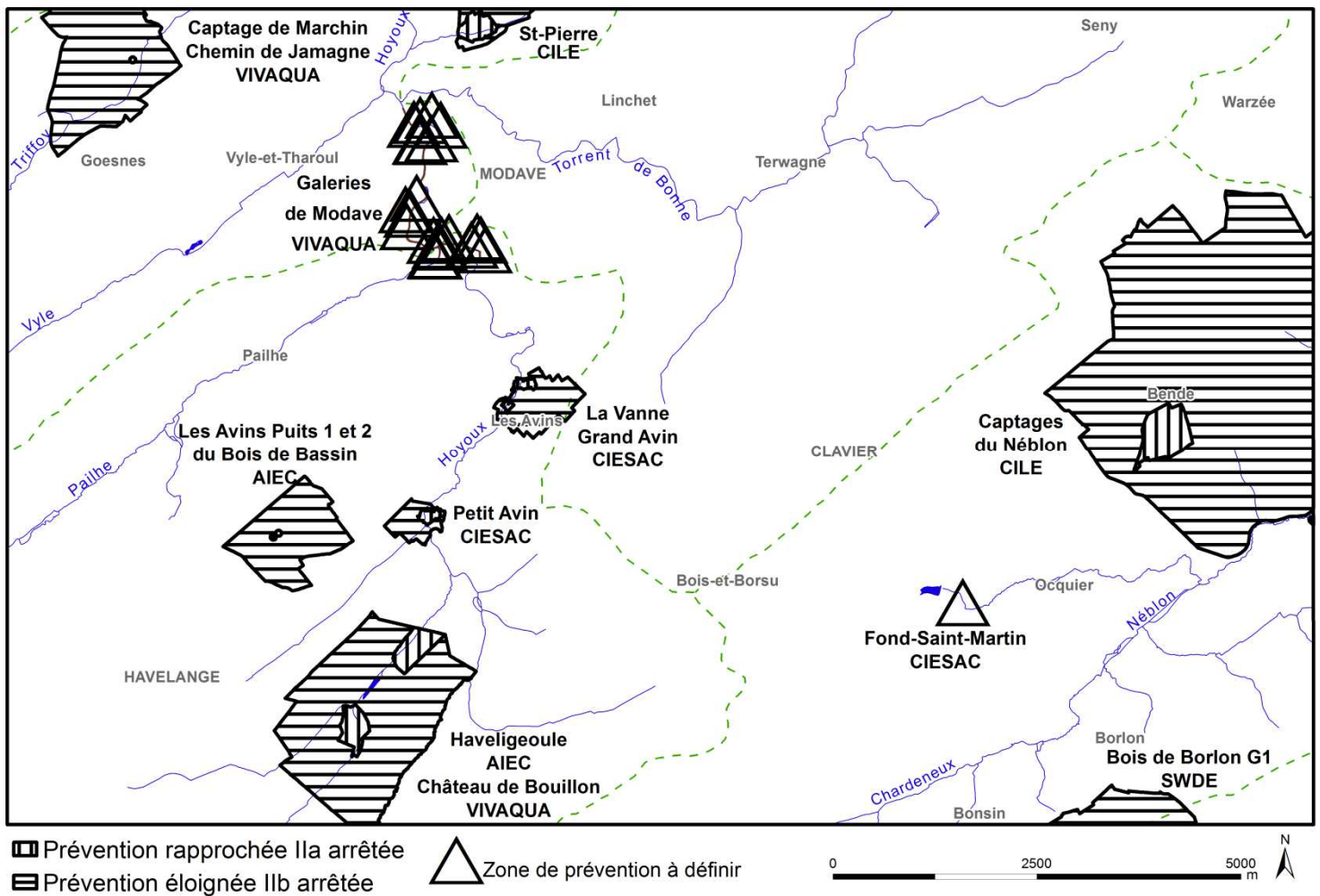


Figure VIII.5: Zones de prévention de la carte Modave-Clavier

VIII.4. ZONES DE PREVENTION DES CAPTAGES LA CILE

Dans le nord de la carte Modave-Clavier, la CILE exploite l'aquifère des calcaires du Carbonifère via sa galerie captage à Limet (captage St-Pierre). Les zones de prévention ont été définies sur base des temps de transfert. Ceux-ci ont été déterminés suite à une étude hydrogéologique exhaustive du site (forages, essais de pompage, tests de traçage, modélisation mathématique)(LGIH, 1994; 2000; 2002). Ce tracé a ensuite été adapté aux limites cadastrales et urbanistiques (Figure VIII.6). Ces zones de prévention (code SPW: CILE004) ont été arrêtées par le Ministre wallon en date du 13 octobre 2004: *Arrêté ministériel relatif à l'établissement des zones de prévention rapprochée et éloignée de l'ouvrage de prise d'eau souterraine dénommé Saint-Pierre, sis au hameau de Limet, sur le territoire de la commune de Modave (M.B. 10.11.2004).*



Figure VIII.6: Zones de prévention arrêtées autour du captage St-Pierre à Limet (carte Modave-Clavier) – CILE

A l'est de la carte Modave-Clavier, sur la carte Hamoir-Ferrières, se trouvent les galeries du Néblon. Les zones de prévention de cet important captage débordent largement sur la carte étudiée. Elles ont été définies sur base des temps de transfert à partir des données collectées par une étude hydrogéologique du bassin d'alimentation des galeries. Ensuite, ces limites ont été adaptées aux limites cadastrales et urbanistiques (Figure VIII.7). Une zone de prévention rapprochée (IIa) a été définie autour de la perte du bois de Marsée, point d'infiltration direct privilégié vers l'aquifère des calcaires du Carbonifère et ainsi vers les captages du Néblon. Ces zones de prévention (code SPW: CILE002) ont été arrêtées par le Gouvernement Wallon, en date du 22 octobre 2004: *Arrêté ministériel relatif à l'établissement des zones de prévention rapprochée et éloignée des ouvrages de prise d'eau souterraine dénommés Galerie principale, Sources Bois, Peupliers, Galerie communale et Galerie Tinkou, sis à Néblon-le-Moulin sur le territoire des communes de Ouffet (province de Liège) et Durbuy (province de Luxembourg) (Mention au M.B. 02.12.2004).*

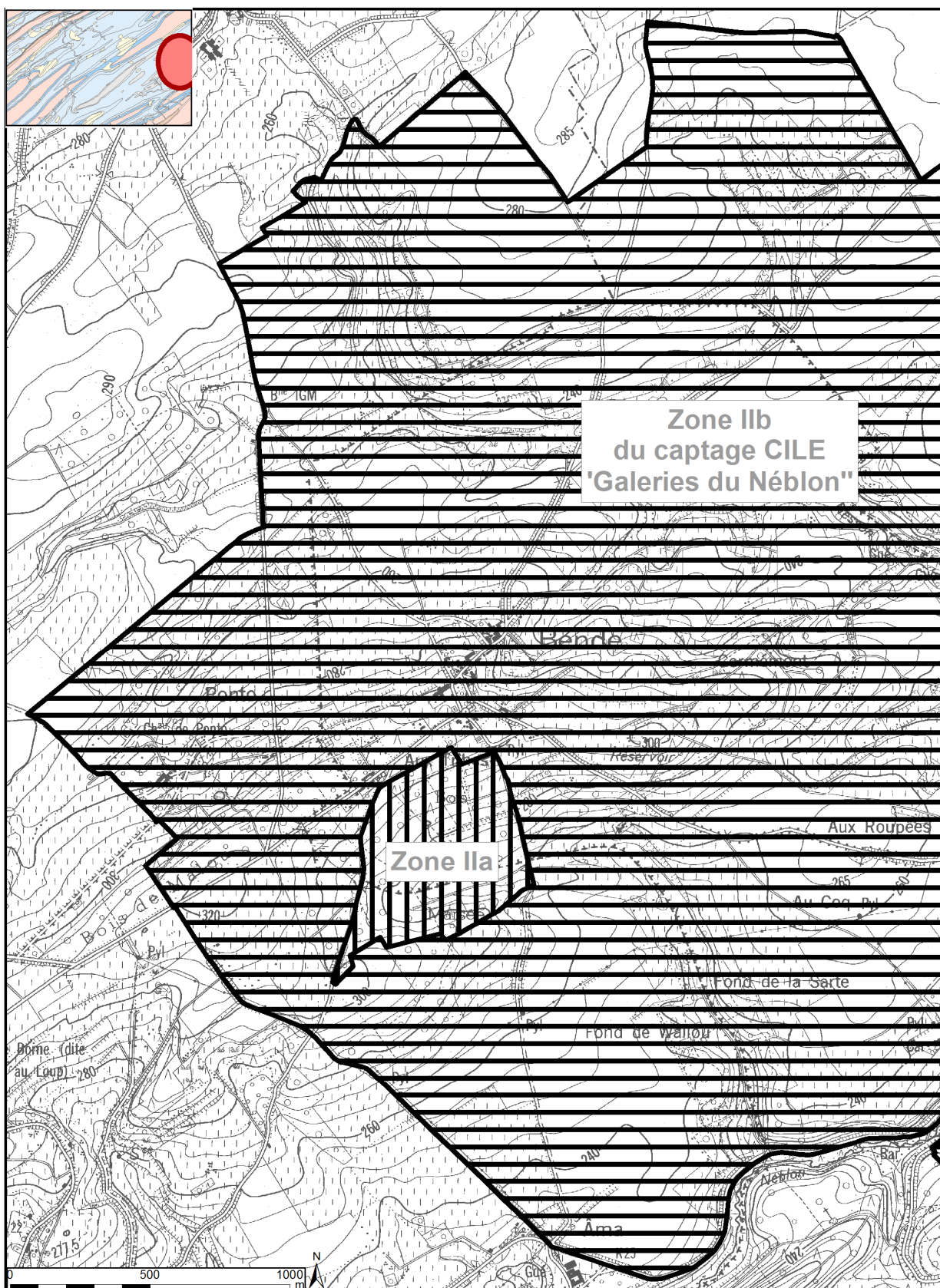


Figure VIII.7: Zones de prévention arrêtées autour des captages du Néblon (carte Modave-Clavier) – CILE

VIII.5. ZONES DE PREVENTION DES CAPTAGES DE VIVAQUA

La société VIVAQUA exploite les eaux souterraines de la carte Modave-Clavier via trois sites de captage. Les eaux prélevées sont acheminées vers Bruxelles et sa région pour l'alimentation en eau potable de la population.

A Marchin, VIVAQUA exploite la source de Jamagne. Les zones de prévention autour de cette prise d'eau ont été définies à partir des distances fixes adaptées aux éléments topographiques et urbanistiques, repérables sur le terrain (CIBE, 1995). Ces zones (code SPW: VIVAQUA02) ont été arrêtées en date du 25 mars 1999: *Arrêté du Gouvernement wallon relatif à l'établissement des zones de prévention rapprochée et éloignée de l'ouvrage de prise d'eau souterraine dénommé "Captage de Marchin" sis Chemin de Jamagne à Marchin (Mention au M.B. 06.05.1999)*. Les tracés sont repris à la figure VIII.8.

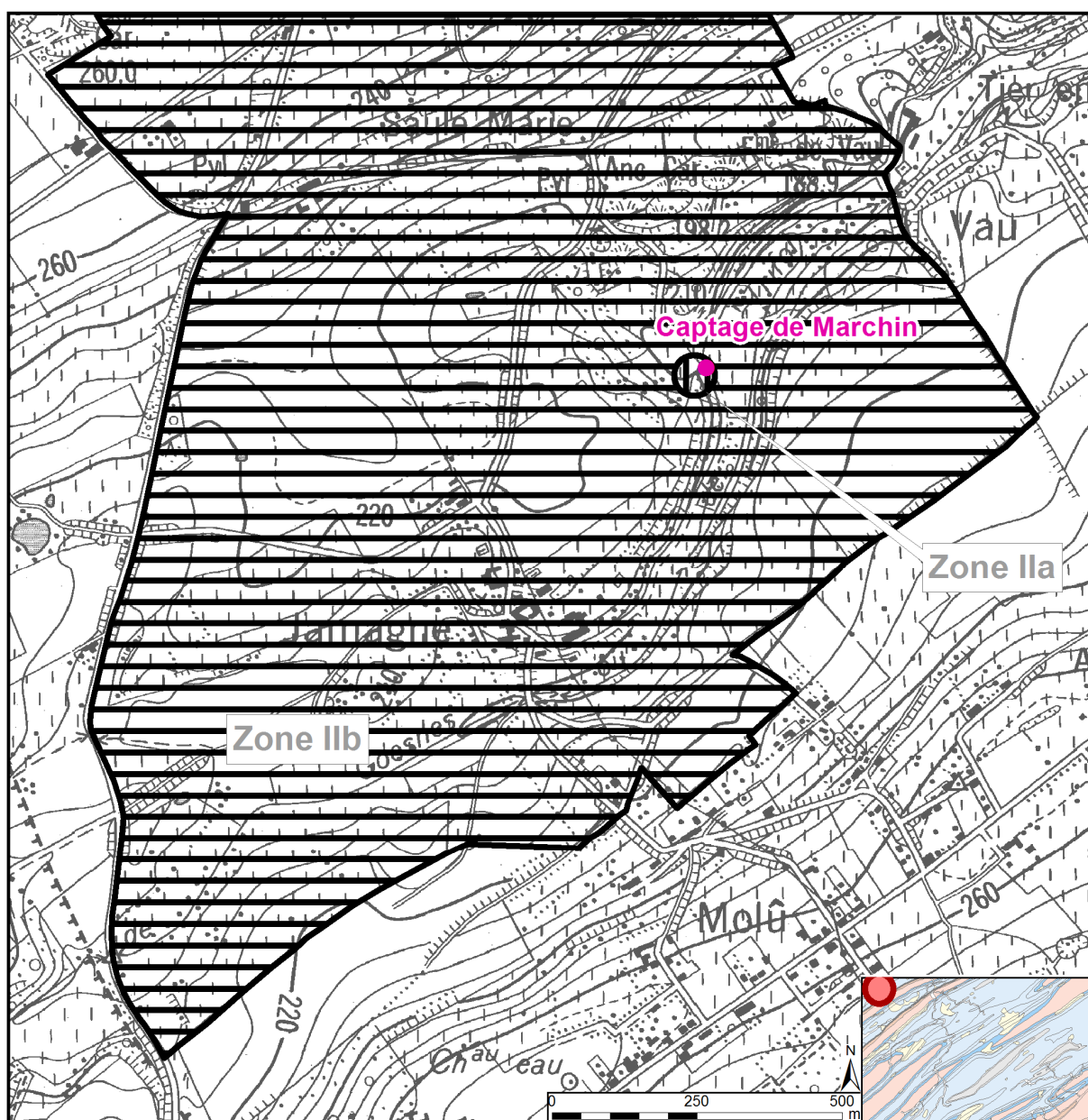


Figure VIII.8: Zones de prévention arrêtées autour du captage de Jamagne (Marchin) – VIVAQUA

A Modave, VIVAQUA exploite les eaux logées dans les calcaires carbonifères via son réseau de galeries et de drains creusés le long du Hoyoux. Une importante étude hydrogéologique a été menée pour aboutir à la délimitation des zones de prévention (VIVAQUA, 2012; GEOLYS, 2011 & 2012). Le dossier est déposé à l'administration (SPW-DGO3). Les zones proposées vont être soumises à l'enquête publique, dernière étape avant la validation du tracé par le ministre (probablement en 2016). En attente de la délimitation officielle de ces zones, le symbole triangulaire 'Zone de prévention à définir' est utilisé sur la carte hydrogéologique principale (1/25.000). La localisation de ces zones de prévention est présente sur la figure VIII.5. Il convient, dès lors, de se référer provisoirement aux distances fixes forfaitaires définies dans la législation soit :

- pour la zone IIa : une distance horizontale minimale de 35 mètres à partir des installations de surface, dans le cas d'un puits, et par deux lignes situées à 25 mètres au minimum de part et d'autre de la projection en surface de l'axe longitudinal dans le cas d'une galerie;
- pour la zone IIb : une distance horizontale 1 000 mètres.

Remarquons que la détermination des zones par la méthode des distances fixes ne tient pas compte de l'existence :

- d'un gradient régional qui limite les risques de pollution des captages à partir de l'aval et augmentent ces mêmes risques vers l'amont;
- de l'hétérogénéité des formations;
- d'axes d'écoulement préférentiel et de phénomènes karstiques.

A Havelange, VIVAQUA possède une galerie drainante, captage nommé aussi 'Château de Bouillon'. La détermination des zones de prévention de ce captage a été réalisée conjointement avec l'étude du captage voisin, la source à l'émergence 'Haveligeoule' de l'AIEC (voir [paragraphe VIII.2](#)). Une étude hydrogéologique a été menée (forages, essais de pompage, traçages)(CIBE-AIEC, 2006). Elle a permis de délimiter les zones de prévention sur base des temps de transfert. Par la suite, afin d'être repérables sur le terrain, ce tracé a été adapté aux limites cadastrales et urbanistiques (Figure VIII.2). Ces zones de prévention (code SPW: VIVAQUA022-AIEC15) ont été arrêtées par le Ministre wallon en date du 2 octobre 2008: *Arrêté ministériel relatif à l'établissement des zones de prévention rapprochée et éloignée des ouvrages de prise d'eau souterraine de catégorie B (potabilisable) dénommés Havelange (Château de Bouillon), sis sur le territoire de la commune d'Havelange et Haveligeoule, sis sur le territoire de la commune de Clavier (M.B. 14.11.2008).*

VIII.6. ZONES DE PREVENTION DU CAPTAGE DE LA SWDE

En bordure septentrionale de la carte Maffe-Grandhan (carte au sud de Modave-Clavier), se trouve la galerie 'Bois de Borlon', exploitée par la SWDE. Sa zone de prévention éloignée (IIb) est partiellement située sur la carte Modave-Clavier (Figure VIII.9).

Les zones de prévention autour de la galerie 'Bois de Borlon' (code SPW: SWDE106) ont été établies sur base d'une étude succincte (SWDE, 2005). Les distances forfaitaires ont été utilisées. Elles ont été adaptées selon le bassin d'alimentation présumé de la prise d'eau (via une analyse topographique, géologique et hydrologique)(figure VIII.9). Ces zones de prévention ont été arrêtées par le Ministre wallon en date du 10 mars 2009: *Arrêté ministériel relatif à l'établissement des zones de prévention rapprochée et éloignée de l'ouvrage de prise d'eau souterraine de catégorie B (potabilisable) dénommé Bois de Borlon G1 sis sur le territoire des communes de Durbuy et Somme-Leuze (M.B. 16.04.2009).*

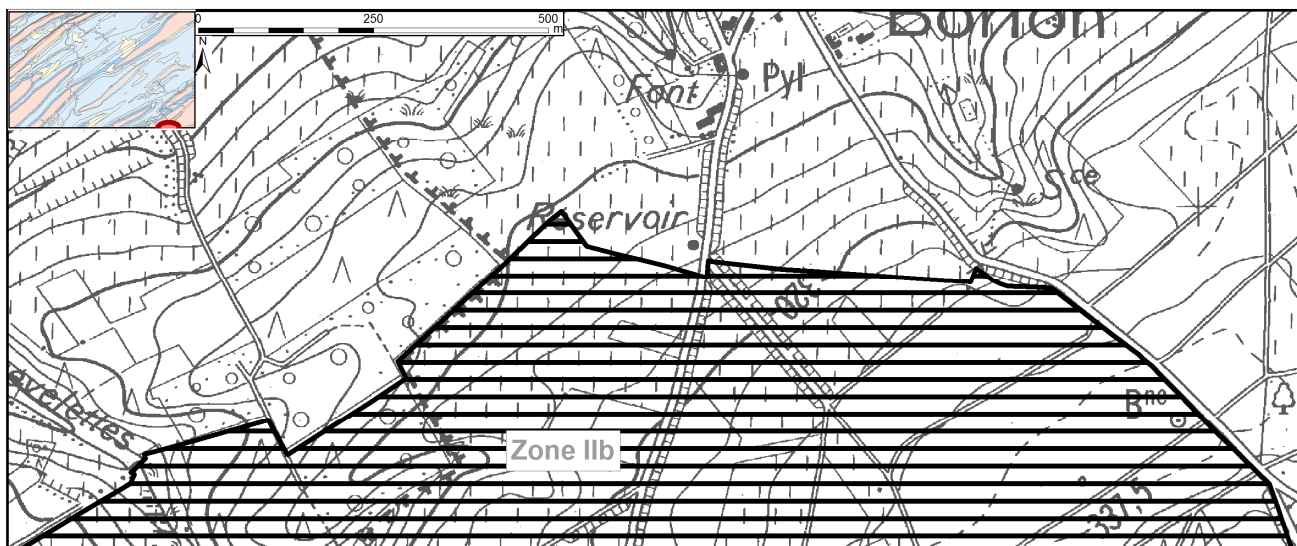


Figure VIII.9: Zones de prévention arrêtées autour du captage 'Bois de Borlon G1' – SWDE

IX. METHODOLOGIE D'ELABORATION DE LA CARTE HYDROGEOLOGIQUE

Ce chapitre décrit brièvement les données géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques utilisées pour construire la carte hydrogéologique Modave-Clavier. Il aborde les principales sources d'informations disponibles pour la région étudiée. Les données collectées sont encodées dans une base de données structurée et mises en cartes. La structure du poster, au format A0, est également présentée dans ce chapitre.

IX.1. ORIGINE DES INFORMATIONS

IX.1.1. Données géologiques et connexes

L'ancienne carte géologique Modave-Clavier, n°157, est utilisée comme fond de référence pour la construction de la carte hydrogéologique. Cette carte a été dressée par Lohest, Forir et Murlon en 1902 (1/40.000). Cette carte a été vectorisée par l'ISSeP.

Des discontinuités avec les cartes voisines entre les limites géologiques et/ou hydrogéologiques peuvent apparaître. Ces disparités sont le résultat de l'utilisation de fonds géologiques de générations différentes. La méthode de levé des nouvelles cartes géologiques est différente de celle employée auparavant (Dejonghe, 2007), ainsi des discontinuités entre les formations géologiques existent entre les différentes générations de cartes. Des discontinuités sur la frontière méridionale de la carte Modave-Clavier sont dues à l'utilisation de fonds géologiques de générations et d'échelles différentes. En effet, la carte hydrogéologique Maffe-Grandhan, au sud, est basée sur la nouvelle carte géologique de Wallonie au 1/25.000 (Barchy & Marion, 2008).

Les trois autres cartes sont toutes basées sur l'ancien fond géologique, assurant une meilleure continuité des unités hydrogéologiques. Il convient cependant de noter que quelques petites discontinuités entre unités hydrogéologiques peuvent subsister. Par exemple, avec la carte Gesves-Ohey (à l'ouest) où la cartographie et la description lithologique des sables cénozoïques diffèrent de celles adoptées sur la carte géologique Modave-Clavier. Une autre discontinuité à la frontière occidentale de la carte relève des changements latéraux de faciès et de l'interprétation hydrogéologique des assises du Famennien supérieur (aquifère ou aquitard).

De nombreux phénomènes karstiques sont observés dans les horizons calcaires du Carbonifère de la carte Modave-Clavier. Ces données proviennent essentiellement de l'atlas du karst wallon (CWE PSS, 1996, 2015).

Plusieurs sites de la région étudiée ont fait l'objet d'investigations géophysiques. Ces zones de prospections géophysiques ont été simplement localisées sur la carte hydrogéologique. Le type de prospection géophysique menée et les références bibliographiques sont mentionnées. Ces investigations ont été réalisées pour l'établissement de prises d'eau, de piézomètres ou dans le cadre de l'établissement des zones de prévention autour des captages publics. Elles ont permis de préciser le contexte géologique de la zone prospectée (lithologie et structural) dans le but de

mieux de déterminer l'emplacement le plus adéquat pour des forages, de définir la nature et l'épaisseur des terrains meubles, de localiser des failles, des axes de fracturation ou des linéaments, de situer l'altitude du sommet du bed-rock.

- Site de St-Pierre à Limet (LGIH, 1994): sondages électriques et sismiques, traînés électriques.
- Site de la carrière "Bois Jean Etienne" à Marchin (LGIH, 1992): sondages et traînés électriques.
- Site de Pailhe (LGIH, 1998): sondages et traînés électriques.
- Site d'Havelange (LGIH, 1997a): sondages et traînés électriques, profils magnétométriques.
- Site de Warzée (LGIH, 1989): sondages et traînés électriques.
- Site de Clavier (LGIH, 1981): sondages et traînés électriques, profils magnétométriques.
- Site de Bois-et-Borsu (LGIH, 1984): sondages et traînés électriques, profils magnétométriques.
- Site de Bende (LGIH, 1986): profils électromagnétiques.
- Site d'Ocquier (LGIH, 1997b): sondages électriques et sismiques, traînés électriques, profils VLF, profils magnétométriques.
- Site d'Ama (LGIH, 1995b): sondages électriques et sismiques, traînés électriques, profils VLF, profils magnétométriques.
- Sites de Bonsin-Borlon et Bende (Di Clemente et Laurent, 1986): sondages électriques et sismiques, traînés électriques.
- Sites de Tharoul, Ossogne, Havelange, Ochain et Clavier (Robert et Nguyen, 2007 - Projet Synclin'Eau): tomographie de résistivité électrique et potentiel électrique spontané.

IX.1.2. Données météorologiques et hydrologiques

Sur le territoire de la carte Modave-Clavier, il y a quatre stations météorologiques. Toutes appartiennent à l'Institut Royal Météorologique:

- la station de Goesnes, K1. Les précipitations et la température y sont mesurées depuis janvier 1984.
- la station de Modave, K5. Les précipitations y sont mesurées depuis janvier 1951.
- la station de Modave PC, K53. Les précipitations y sont mesurées depuis janvier 1951.
- la station d'Havelange, K54. Les précipitations y sont mesurées depuis janvier 1951.

Quatre stations limnimétriques sont situées sur le territoire de la carte Modave-Clavier. Elles sont gérées par Service Public de Wallonie (DCENN, DESO et SETHY). Elles sont installées sur le Hoyoux (3) et sur le ruisseau 'Torrent de Bonne'.

- Station de Modave (n°7228). Les hauteurs d'eau sont mesurées depuis décembre 1986.
- Station de Torrent de Bonne (n°L7030).
- Sondes limnimétriques (DESO) sur le Hoyoux à Modave et Petit-Avin.

IX.1.3. Données hydrogéologiques

IX.1.3.1. Localisation des ouvrages

Dans la base de données BD-Hydro et la GeoDataBase (liée au projet SIG de la carte hydrogéologique), 200 ouvrages ont été encodés dont 85 puits (puits forés et puits traditionnels), 64 piézomètres, 18 galeries (y compris les puits d'accès) et 9 drains. Sont aussi encodées des informations concernant 18 sources (exploitées ou non) et 6 forages pour sonde géothermique¹⁶. Ces données proviennent de sociétés de distribution d'eau (AIEC et SWDE), d'industriels, de divers rapports techniques (voir liste bibliographique), d'agriculteurs et de particuliers ainsi que de la base de données de la Région Wallonne (10-sous), <http://carto1.wallonie.be/10SousInt>. Ces données ont été complétées par la campagne de terrain menée en 2000 (à l'occasion de la première version de la carte) et par diverses études hydrogéologiques réalisées sur le territoire de la carte.

De plus, selon l'atlas du karst wallon, quatre résurgences et douze pertes sont recensées sur le territoire de la carte Modave-Clavier. Tous ces éléments karstiques sont repris sur la carte principale du poster.

Lorsqu'il est disponible, le tracé des galeries et des drains figure sur la carte principale au 1/25.000. Sont reprises sur la carte Modave-Clavier, les galeries de Modave et la galerie 'Château de Bouillon'. Ces tracés ont été fournis par VIVAQUA. Sur la carte Modave-Clavier, on compte 4 sites de captages comprenant des ouvrages linéaires de prise d'eau (galeries et drains):

- Galeries et drains de Modave (VIVAQUA).
- Galerie 'Château de Bouillon' à Havelange (VIVAQUA).
- Galerie 'Saint-Pierre' à Limet (CILE).
- Galerie 'La Vanne' aux Avins (CIESAC).

IX.1.3.2. Données piézométriques

La base de données BD-Hydro, la banque de données '10-sous' ainsi que la base de données PIEZ'EAU comptabilisent un jeu de données piézométriques important. A ce jour, environ 30 000 valeurs de niveaux d'eau sont disponibles pour une centaine de puits et piézomètres répartis sur le territoire de la carte Modave-Clavier. La plupart de ces ouvrages appartiennent aux sociétés de distribution publique d'eau et à l'administration wallonne (SPW-DESO). Ces

¹⁶ Il s'agit de forages creusés uniquement pour descendre une sonde géothermique en profondeur. Ils sont ensuite rebouchés (cimentés) et c'est le liquide caloporteur qui circule. Il n'y a donc pas de prise d'eau à proprement-dit.

dernières effectuent des relevés réguliers sur plusieurs forages. Il existe moins de mesures au droit des puits privés, généralement difficilement accessibles.

Dans la zone de Modave, une campagne de mesures piézométriques a été réalisée en 2009 dans le cadre de l'étude des zones de prévention des galeries captages de VIVAQUA. Lors de l'étude hydrogéologique du bassin du Néblon, un relevé piézométrique a été réalisé (juillet 1998). Ces données, sous la forme d'isopièzes, figurent sur la carte principale du poster ainsi que des niveaux piézométriques ponctuels.

Sur la carte principale et la coupe hydrogéologique du poster, quelques données piézométriques sont présentées. Dans le [chapitre IV.2](#), sur base des quelques données disponibles, le contexte piézométrique est développé.

IX.1.3.3. Données hydrochimiques et tests sur les puits

L'essentiel des données hydrochimiques ont été fournies par la Direction des Eaux Souterraines (SPW-DESO). Des résultats d'analyses de campagnes de prélèvements ont aussi été fournis par les compagnies d'eau et dans divers rapports d'études hydrogéologiques.

Ainsi, une septantaine de sites (puits et piézomètres, drains, galeries, sources) sont concernés, comptabilisant environ 12 000 valeurs. Les premières données datent de 1983. Ces analyses caractérisent la plupart des unités hydrogéologiques de la carte Modave-Clavier. Ces points, où des données chimiques sont disponibles, sont reportés sur la carte thématique des informations complémentaires et du caractère des nappes. Le [chapitre V](#) décrit, plus en détails, le cadre hydrochimique des unités hydrogéologiques rencontrées sur la carte.

Divers tests sont parfois menés sur les puits, tels que des diagraphies, des essais de pompage, des tests de traçage afin de mieux connaître le contexte hydrogéologique dans lequel ces ouvrages sont implantés. Ces données proviennent généralement des sociétés de distribution publique d'eau, d'études hydrogéologiques diverses. Le résultat de ces tests (essais de pompage essentiellement) est synthétisé au [chapitre VII](#). Sur la carte thématique des informations complémentaires, les puits ayant fait l'objet de tels tests sont mis en évidence par divers symboles. Ils sont très peu nombreux. 39 puits, piézomètres ou pertes où des essais de pompage et/ou essai de traçage ont été effectués, sont répertoriés.

IX.1.4. Autres données

La carte hydrogéologique de Wallonie est composée aussi d'informations relatives aux zones de prévention autour des captages, aux zones vulnérables aux nitrates, etc. En fonction de la région étudiée, ces couches d'informations ne sont pas toujours présentes.

Plusieurs zones vulnérables aux nitrates ont été définies en Wallonie. La carte Modave-Clavier est entièrement comprise dans la zone dite du Sud Namurois. Le contour de cette zone a été fourni par le SPW. De plus amples renseignements sont repris au [paragraphe V.2](#).

Sur la carte Modave-Clavier, huit zones de prévention arrêtées sont reportées sur la carte principale. Le contour de ces zones a été fourni par le Service Public de Wallonie. Auxquelles s'ajoutent deux autres captages soumis à zones de prévention dont, à ce jour, la délimitation des zones est en cours. Ces zones sont décrites au [chapitre VIII](#).

IX.2. BASE DE DONNEES HYDROGEOLOGIQUES

De telles données, aussi complexes et plus ou moins abondantes, nécessitent une organisation structurée de manière à optimiser leur stockage, leur gestion et leur mise à jour. Ainsi une base de données hydrogéologiques géorelationnelle a été développée (Gogu, 2000; Gogu *et al.*, 2001). Cette première version de la base de données BD-HYDRO a été régulièrement améliorée.

Dans un souci d'homogénéité entre les équipes et d'autres institutions (dont l'administration wallonne, DGARNE), la base de données a été révisée. Le but est de créer un outil de travail commun et performant, répondant aux besoins des spécialistes impliqués dans la gestion des eaux souterraines. Les données hydrogéologiques dispersées géographiquement devaient être disponibles dans une seule base de données centralisée.

Ainsi les données détaillées de l'hydrochimie, de la piézométrie, des volumes exploités, des paramètres d'écoulement et de transport, de géologie telles que les descriptions de log de forage et d'autres données administratives ou autres sont stockées dans la BD-HYDRO (Wojda *et al.*, 2005). Elle regroupe toutes les informations disponibles en matière d'hydrogéologie en Région wallonne. Parmi les nombreuses et diverses données de la BD-HYDRO on trouve des informations relatives à la localisation des prises d'eau (puits, sources, piézomètres,...), leurs caractéristiques géologiques et techniques, ainsi que des données sur la piézométrie, la qualité physico-chimique des eaux souterraines, les volumes prélevés... Les divers tests (diagraphies, essais de pompage, essais de traçage, prospection géophysique) sont également encodés dans la BD-HYDRO. Elle est également enrichie avec les informations sur les études, rapports et autres documents hydrogéologiques écrits. Ces renseignements se présentent sous la forme de métadonnées.

IX.3. POSTER DE LA CARTE HYDROGEOLOGIQUE

Le poster de la carte hydrogéologique est composé de plusieurs éléments:

- la carte hydrogéologique principale (1/25.000);
- les cartes thématiques (1/50.000):
 - Carte des informations complémentaires et du caractère des nappes;
 - Carte des volumes d'eau prélevés;
- la coupe hydrogéologique (avec deux échelles verticales);
- le tableau de correspondance 'Géologie-Hydrogéologie';
- la carte de la Belgique (1/5.000.000) où est localisée la carte étudiée.

IX.3.1. Carte hydrogéologique principale

La carte principale (1/25 000) comprend plusieurs couches d'informations :

- le fond topographique de la carte IGN 1/10 000, sous licence SPW-DGO3;
- le réseau hydrographique;
- les unités hydrogéologiques;
- les failles;
- les piézomètres;
- les puits des sociétés de distribution d'eau ;
- les puits privés exploités et déclarés à la Région wallonne ;
- les sources exploitées ou non;
- les puits d'accès aux galeries et drains;
- les sondes géothermiques;
- les pertes et résurgences connues;
- les stations limnimétriques;
- les stations climatiques;
- les isopièzes: aquifère des calcaires du Carbonifère (région de Modave, 2009 et bassin du Néblon, 1998);
- des valeurs de niveau des autres unités hydrogéologiques, avec la date de la mesure;
- les zones de prévention IIa et IIb arrêtées par le Gouvernement Wallon;
- les zones de prévention à définir;
- le trait localisant le tracé de la coupe hydrogéologique.

IX.3.2. Carte des informations complémentaires et du caractère des nappes

Cette carte localise les différents sites où des données quantitatives ou qualitatives sont disponibles (analyses chimiques, diagraphies, essais de pompage, essais de traçage). Des informations sur l'état hydrochimique des unités hydrogéologiques de la carte étudiée sont détaillées dans le [chapitre V](#). Plusieurs essais de pompage ont été réalisés dans cette région. Les paramètres hydrodynamiques mesurés et calculés sont présentés dans le [chapitre VII](#).

Le caractère des nappes rencontrées est également spécifié. Il s'agit de définir si les nappes sont libres, semi-captives (semi-libres) ou captives (voir [chapitre IV.2.8](#))

Les zones de prospections géophysiques sont également localisées. Le but de ces investigations géophysiques est de mieux connaître le sous-sol, ses caractéristiques géométriques, la nature des terrains en vue, entre autres, d'optimiser l'implantation des futurs puits et piézomètres. La carte hydrogéologique n'ayant pas pour objectif de présenter en détails les méthodes employées et les résultats obtenus, une simple liste des sites étudiés est dressée. Pour plus d'informations sur les campagnes de prospection géophysique, le lecteur est invité à consulter les dossiers mentionnés au paragraphe IX.1.1.

IX.3.3. Carte des volumes d'eau prélevés

Sur cette carte thématique, sont reportés l'ensemble des points hydrogéologiques (forages, drains, sources, résurgences/pertes) classés selon l'unité hydrogéologique sollicitée. Parfois sur certaines cartes, il n'est pas possible de déterminer dans quelle formation géologique les ouvrages ont été implantés ne disposant pas d'information sur le log géologique ou/et la profondeur du puits.

Cette carte, au 50.000^{ème}, reprend également les volumes d'eau prélevés annuellement, informations extraites de la base de données de la Région Wallonne "dix-sous" (DGARNE). Les volumes représentés sont les volumes déclarés par les titulaires au Service Public de Wallonie. Deux catégories de volumes sont répertoriées sur la carte Modave-Clavier, les volumes destinés à la distribution publique d'eau potable et les autres volumes (particuliers, agriculteurs, industries...). Les données présentées sur cette carte sont les volumes prélevés (selon les déclarations des titulaires), respectivement, en 2012 et 2014.

L'exploitation d'une prise d'eau souterraine est soumise à de nombreux aléas et donc, peut être variable. Les contraintes techniques de l'ouvrage, l'activité économique, liée à ce captage, et l'évolution des conditions hydrogéologiques de la nappe sollicitée, peuvent perturber les capacités de production. La présentation, sur la carte des Volumes, des volumes moyens prélevés, correspond à la moyenne des cinq dernières années (2008-2012) (basés sur les déclarations des titulaire de prise d'eau). Ils illustrent de manière plus réaliste l'exploitation des eaux souterraines sur la carte étudiée. Ces valeurs moyennes ne sont pas représentatives du potentiel d'exploitation ni de l'exploitation réelle des nappes. Elles reflètent simplement l'importance d'un site d'exploitation pendant les cinq années considérées. Parmi ces dernières, il se peut que certaines d'entre elles soient des années sans prélèvement. Le [chapitre VI](#) consacré à l'exploitation des aquifères reprend l'historique des principaux captages de la carte.

IX.3.4. Tableau de correspondance 'Géologie-Hydrogéologie'

Le tableau lithostratigraphique reprend la liste des différentes formations géologiques susceptibles d'être rencontrées sur la carte Modave-Clavier, traduites en termes d'unités hydrogéologiques. La définition de ces unités est présentée en détails dans le [chapitre IV](#).

IX.3.5. Coupes hydrogéologiques

Parmi les éléments présentés sur le poster de la carte hydrogéologique Modave-Clavier figurent les coupes hydrogéologiques. Elles permettent de comprendre dans son ensemble le contexte géologique de la région. Les grandes structures géologiques y apparaissent. Cette coupe est tracée sur base de l'ancienne carte géologique (1902). Une coupe avec exagération des hauteurs (facteur d'échelle X5) a également été dessinée. Ainsi, là où la donnée est disponible, des informations sur le niveau piézométrique des nappes ont été indiquées. Ces coupes sont commentées, en détails, au [paragraphe IV.2.4](#).

X. BIBLIOGRAPHIE

Barchy L & Marion JM (2008): Carte géologique de Maffe-Grandhan et sa notice. *Service public de Wallonie, DGARNE*, Namur. 64 pp

Barchy L & Marion JM (sous presse): Carte géologique de Wallonie à l'échelle 1/25.000. Modave-Clavier n°48/7-8 et sa notice explicative. Service public de Wallonie, DGO 3 (DGARNE), Namur, Belgique

BCG (2005a): Galerie d'Havelange (C.I.B.E.)-Source à l'émergence d'Haveligeoule (A.I.E.C.) - Etude des zones de prévention: Campagne de pompages d'essai. 19 p + annexes. Dossier 04319. Bureau Conseil en Géologie. Mars 2005

BCG (2005b): AIEC: Havelange. Captages du Bois de Bassin. Détermination des zones. 30 p + annexes. Bureau Conseil en Géologie. Octobre 2005

BCG (2011). CIESAC. Captage du Fond Saint Martin – 48/8/8/002 – Vervoz (Clavier). Délimitation des zones de prévention. 17 p + annexes. Bureau Conseil en Géologie. Avril 2011

Boulvain F. & Pingot JL. (2011): Genèse du sous-sol de la Wallonie. Classe des Sciences, Collection in-8, ISSN 0365-0936 ; 34. *Académie royale de Belgique*, 190 pp

Brouyère, S. ; Gesels, J. ; Goderniaux, P. ; Jamin, P. ; Robert, T. ; Thomas, L. ; Dassargues, A. ; Bastien, J. ; Van Wittenberge, F. ; Rorive, A. ; Dossin, F. ; Lacour, J.-L. ; Le Madec, D. ; Nogarède, P. ; Hallet, V. (2009) : Caractérisation hydrogéologique et support à la mise en œuvre de la Directive Européenne 2000/60 sur les masses d'eau souterraine en Région Wallonne (Projet Synclin'EAU), livrables D.2.22 & D.3.12 – partie RWM021 (caractérisation: synthèse), D3.52 & D4.52 (interactions ESU-ESO), Traçages. Convention RW et SPGE-Aquapole

Brouyère, S., Briers, P., Orban Ph. (2015a): Caractérisation complémentaire des masses d'eau dont le bon état dépend d'interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines (Projet ESO-ESU). Livrable D2.3: Rapport technique relatif au forage des piézomètres et micropiézomètres. Convention SPW-ULg(HGE)

Brouyère S., Briers, P., Orban Ph., Schmit, F., Rochez G, Hallet V. (2015b): Caractérisation complémentaire des masses d'eau dont le bon état dépend d'interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines (Projet ESO-ESU). Livrable D2.4 Réseau et programme de monitoring mis en place sur les sites tests. Convention SPW-ULg(HGE)

Bultynck, P. & Dejonghe, L. (2001): Guide to a revised lithostratigraphic scale of Belgium. *In Bultynck & Dejonghe, eds, Geologica Belgica*, Brussels, 4/1-2,168 pp.

Castany, G. (1998): Hydrogéologie, principes et méthodes, *Dunod*, 236 p.

Castiau, E., Neuray, C., Nielsen M., Pons, T., Vanderheyden V., Van Der Kaa C., De Witte C. & Godart M-F., Teller J. (direction scientifique). (2010): 3. Le Plateau condrusien. Collection : Atlas des Paysages de Wallonie, *Service public de Wallonie*, Namur, pp 287 -

<http://cpdt.wallonie.be/publications/atlas-des-paysages-de-wallonie/atlas-des-paysages-de-wallonie-3>

CIBE (VIVAQUA) (1995): Captage de Marchin – Demande de prise d'eau et délimitation des zones de prévention. Compléments d'information. 7 p. Novembre 1995

CIBE (VIVAQUA) – AIEC (2006): Constitution des zones de prévention du captage d'Havelange (CIBE) et du captage d'Haveligeoule (AIEC). Rapport d'étude. 58 p + annexes. Juillet 2006

CWEPSS (1996): Atlas du Karst Wallon: Inventaire cartographique et descriptif des sites karstiques et rivières souterraines de Wallonie. *DGARNE & CWEPSS* (Commission Wallonne d'Etude et de Protection des Sites Souterrains asbl) <http://www.cwepss.org/atlasKarst.htm> + actualisation des données (version informatique, 2015)

Dassargues, A. (2010): Hydrogéologie, Notes de cours, Université de Liège, non publié.

Dejonghe L. (2007): Guide de lecture des cartes géologiques de Wallonie au 1/25 000. *Service Public de Wallonie*, 3^e édition, 51p.

de Marsily, G. (2004): Cours d'hydrogéologie. Paris, Université Pierre et Marie Curie. 226 p.

DGARNE-Direction des Eaux souterraines et Protectis-Cellule DCE. (2010): Directive cadre de l'eau. Etat des lieux des districts hydrographiques. Fiches de caractérisation des masses d'eau souterraine. juin 2010.

http://environnement.wallonie.be/directive_eau/edl_ssb/GuideFichesMESO_v1_20.pdf

<http://spw.wallonie.be/dce/fme/RWM021.pdf>

<http://spw.wallonie.be/dce/fme/RWM023.pdf>

Di Clemente C & Laurent S. (1986): Contribution à l'étude hydrogéologique du bassin du Néblon. Travail de fin d'étude. Fac.Sc.Appliquées. Université de Liège.

Dreze M. (1997): Contribution à l'étude hydrogéologique du bassin versant du Néblon. Travail de fin d'étude. Fac.Sc.Appliquées. Université de Liège

Droeven, E., Feltz, C. & Kummert, M. (2004): Les territoires paysagers de Wallonie. *Conférence permanente du développement territorial, Etudes et Documents 4*, Service public de Wallonie, Namur, pp 74.

Foucault, A. & Raoult, J. F. (2000): Dictionnaire de géologie. 5e éd. *ed.*, Masson sciences. Paris: Dunod.

Gaule D (1998): Etude de la vulnérabilité d'un aquifère karstique. Application au bassin du Néblon. Travail de fin d'étude. Fac.Sc.Appliquées. Université de Liège.

GEOLYS (2008): Suivi technique et administrative de forage de piézomètres dans le cadre de l'étude dénommé "Caractérisation hydrogéologique et support à la mise en œuvre de la directive européenne 2006/60 sur les masses d'eau souterraine en Région wallonne" – MRW012 et MRW021 zone est – CSC: SYNCL 3/ ULG. Rapports techniques des forages. D470. Novembre 2008

GEOLYS (2011): VIVAQUA - Suivi de l'installation de piézomètres en périphérie du captage de Modave et interprétation d'essais de pompage – Rapport de synthèse et proposition d'essais de traçage. 24 p + annexes. Rapport D620. Mai 2011

GEOLYS (2012): VIVAQUA – Dossier administratif de demande de périmètres des zones de prévention. 27 p + annexes. Rapport D620/2. Avril 2012

Gesels J, Nogagère P, Hallet V, Brouyère S (2014): Calcaires et grès du Synclinorium de Dinant *in* Watervoerende lagen & grondwater in België – Aquifères & eaux souterraines en Belgique, Partie 1, Chapitre 22, pp. 257-274. *Academia Press*

Gogu, R.C. (2000): Advances in groundwater protection strategy using vulnerability mapping and hydrogeological GIS databases, *Thèse de doctorat, Université de Liège.*

Gogu, R.C., Carabin G., Hallet V., Peters V., Dassargues A., (2001): GIS-based hydrogeological databases and groundwater modelling, *Hydrogeology Journal*: 9: 555-569.

Hallet V., Péters V., Ruthy I., Gogu R.C. & Monjoie A. (2000). Carte hydrogéologique de Wallonie (prototype), Modave-Clavier, 48/7-8. 1:25000. Namur, Service Public de Wallonie, Direction générale opérationnelle Agriculture, Ressources naturelles et Environnement, 1 notice explicative de 43 p. + annexes

Hance L, Poty E, Devuyst FX (2001): Stratigraphie séquentielle du Dinantien type (Belgique) et corrélation avec le nord de la France (Boulonnais, Avesnois). *Bull. Soc. géol. France*. T174, n°4, pp 411-426.

HGE-ULg (2003): Etude hydrogéologique préliminaire des captages de Modave de la Compagnie Intercommunale Bruxelloise des eaux (CIBE-VIVAQUA). Université de Liège, Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement. 51 p. Septembre 2003

ICEW (2012): Les Indicateurs Clés de l'Environnement Wallon (ICEW 2012)- Direction de l'Etat Environnemental - SPW - DGARNE - DEMNA – DEE- <http://etat.environnement.wallonie.be>

Lafleur S. (1997): Etude hydrogéologique des régions de Havelange et d'Achet. Travail de fin d'étude. Fac.Sc.Appliquées. Université de Liège.

Légende de la Carte Numérique des Sols de Wallonie (**CNSW**) – version 2 (2007). Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux – Laboratoire de Géopédologie, en relation avec le PCNSW (convention pour le compte de la Région Wallonne – DGA), 54 p. + 2 annexes

Leroy, M., Couturier, J., Orban, Ph., Brouyère, S., Dassargues, A. (2010) : Caractérisation hydrogéologique et support à la mise en œuvre de la Directive Européenne 2000/60 sur les masses d'eau souterraine en Région Wallonne (Projet Synclin'Eau), livrable D.6.2 – Travaux de calibration et validation des modèles d'écoulement et de transport de solutés développés pour les trois masses d'eau souterraine RWM021, RWM012 et RWM011. Convention RW et SPGE-Aquapole.

LGIH (1981): Compagnie Intercommunale des Eaux des Avins - Groupe Clavier. Etude hydrogéologique du site du réservoir de Bois-et-Borsu. AV/811

LGIH (1984): Intercommunale des Avins - Groupe Clavier. Forages de reconnaissance de Bois-et-Borsu. AV/841. Essais complémentaires. AV/842

LGIH (1986): Etude hydrogéologique de bassin versant du Néblon. LGIH-INIEX-CILE

LGIH (1989): Aquifères gréseux. Zone prototype. Rapport final. RW/892

LGIH (1992): Etude hydrogéologique de l'impact de la remise en exploitation de carrière 'Bois Jean Etienne'. MAR/921

LGIH (1994): Captage St-Pierre à Limet. Etude hydrogéologique. CILE/941

LGIH(1995a): Etude des zones de protection des captages de la CILE. Phase 1. Galeries captantes du Néblon. CILE/952

LGIH (1995b): Captage du Néblon II à Ama-Ocquier. Etude géophysique et hydrogéologique. CILE/953

LGIH (1997a): Intercommunale des Eaux du Condroz. Site de Havelange. Forages de puits et pompes d'essai. AIEC/971

LGIH (1997b): Captage du Néblon II. Zone Ama-Ocquier. Prospection géophysique complémentaire. CILE/976

LGIH (1998): Etude hydrogéologique à Pailhe. Rapport technique. SMAP/981

LGIH (2000): Captage St-Pierre à Limet. Etude des zones de prévention. Modélisation mathématique préliminaire. Première estimation des zones de prévention. Proposition d'implantation de piézomètres. CILE/2000-02

LGIH (2001): Captage St-Pierre à Limet. Déroulement des essais de pompages et résultats obtenus. CILE. Mars 2001

LGIH (2002): Captage St-Pierre à Limet. Etude des zones de prévention. Modélisation mathématique. CILE/2002-02. & Réponses aux remarques et questions de l'Observatoire des Eaux Souterraines (SPW). CILE/2002-02bis

Lohest M, Forir H., Murlon M. (1902): Carte géologique de Belgique, 1/40.000. Planchette 157 de Modave-Clavier, Service Géologique de Belgique

Meus Ph (1993): Hydrogéologie d'un aquifère karstique du calcaire carbonifère de Belgique (Néblon-Anthisnes). Apport des traçages à la connaissance des milieux fissurés et karstifiés. *Thèse de doctorat, Université de Liège*

Pfannkuch, H-O. (1990): Elsevier's Dictionary of Environmental Hydrogeology, *Elsevier*.

Popescu I.C., Dachy M, Brouyère S & Dassargues A. (2004): Test d'une méthode de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque applicable aux nappes aquifères de la Région Wallonne. Application à l'aquifère calcaire du Néblon. Rapport Final. Convention RW-ULg, Geomac (Hydrogéologie), 154 p.

Poty E., Hance L., Lees A. & Hennebert M. (2002): Dinantian lithostratigraphy units (Belgium). In Bultynck & Dejonghe, eds., *Guide to a revised lithostratigraphic scale of Belgium. Geologica Belgica*, 4, 1-2 : 69-94

Robert, T. & Nguyen, F. (2007): Rapport des prospections géophysiques *in* Caractérisation hydrogéologique et support à la mise en œuvre de la Directive Européenne 2000/60 sur les masses d'eau souterraine en Région Wallonne – Projet Synclin'EAU). Convention RW et SPGE-Aquapole.

Sorel A., Rekk S., Capette L. & Hallet V. (2015). Carte hydrogéologique de Wallonie, Planchettes Gesves - Ohey n° 48/5-6. Edition: Service public de Wallonie, DGO 3 (DGARNE), Namur, Belgique

SPW-DGO3 (2014): Etat des nappes d'eau souterraine de Wallonie. Edition : Service public de Wallonie, DGO 3 (DGARNE), Belgique. Dépôt légal D/2014/11802/11 - ISBN 978-2-8056-0142-2 – Mars 2014 – Treizième année - <http://environnement.wallonie.be/de/eso/atlas/>

SWDE (2005): Type et nature de l'aquifère alimentant les ouvrages de prise d'eau de Durbuy (Bois de Borlon G1). Synthèse de l'étude géologique et hydrogéologique. Service Protection des Ressources et Captages. 7 pp. Décembre 2005

UNESCO-OMM, (1992): Glossaire International d'Hydrologie, seconde édition, 413p

VIVAQUA (2012): Délimitation des zones de prévention du captage de Modave. Rapport d'étude. 19 p + annexes. Juillet 2012

Wojda, P., Dachy, M., Popescu, C., Ruthy, I., Gardin, N., Brouyère, S. & Dassargues, A. (2005): Appui à la conception de la structure, à l'interfaçage et à l'enrichissement de la base de données hydrogéologiques de la Région wallonne, *Convention subsidiée par Service public de Wallonie, DGARNE – Université de Liège*

ANNEXE 1: LISTE DES ABREVIATIONS DES INSTITUTIONS ET ORGANISMES

- **AIEC**: Association Intercommunale des Eaux du Condroz
Rue des Scyoux, 20 à 5361 SCY
<http://www.eauxducondroz.be/>
- **CIESAC**: Compagnie Intercommunale des Eaux de la Source de Les Avins ~ CLAVIER
Rue de la Source, 10 à 4560 CLAVIER
<http://www.ciesac.be/>
- **HGE-GEO³** : Hydrogéologie & Géologie de l'Environnement- GEO³ - ArGEnCo – ULg
Bâtiment B52, niveau –1, Sart-Tilman à 4000 LIEGE
<http://www.argenco.ulg.ac.be/geo3>
- **IRM**: Institut Royal Météorologique, Section Climatologie.
Avenue Circulaire, 3 à 1180 BRUXELLES
<http://www.meteo.oma.be/IRM-KMI/>
- **ISSeP**: Institut Scientifique de Service Public
Rue du Chéra, 200 à 4000 LIEGE
<http://www.issep.be>
- **SGB**: Service Géologique de Belgique.
Département VII de l'Institut royal des Sciences Naturelles de Belgique
Rue Jenner, 13 à 1000 BRUXELLES
<http://www.sciencesnaturelles.be/geology>
- **SPAQuE**: Société Publique d'Aide à la Qualité de l'Environnement
Boulevard d'Avroy, 38/6 à 4000 LIEGE
<http://www.spaque.be> <http://www.walsols.be/>
- Service Public de Wallonie (**SPW**)
Depuis le 1^{er} août 2008, le Ministère wallon de l'Équipement et des Transports (MET) et le Ministère de la Région Wallonne (MRW) ont fusionné pour donner naissance au **Service public de Wallonie (SPW)**. Ainsi la DGRNE est reprise dans la Direction générale opérationnelle 3 (DGO3) dont les domaines de compétences sont l'Agriculture, les Ressources naturelles et l'Environnement. La Direction des Eaux Souterraines est incluse dans le Département de l'Environnement et de l'Eau.
DGO3 - Direction générale opérationnelle Agriculture, Ressources naturelles et Environnement (D GARNE)
Département de l'Environnement et de l'Eau
Direction des Eaux souterraines (**DESO**) & Direction des Eaux de Surface
Avenue Prince de Liège, 15 à 5100 Jambes

<http://environnement.wallonie.be/> - <http://aqualim.environnement.wallonie.be>

Département de la Ruralité et des Cours d'eau

Direction des Cours d'eau non navigables (**DCENN**)

DGO2: Direction générale opérationnelle de la Mobilité et des Voies hydrauliques – **SETHY**: Direction des voies hydrauliques (D.G.2) - Division des Études et des Programmes- Direction des Etudes hydrologiques et des Statistiques + service d'études hydrologiques (SETHY)(D.212).

Boulevard du Nord, 8 à 5000 NAMUR

Depuis le 1^{er} août 2008, ce service fait partie de la Direction Générale Opérationnelle Mobilité et Voies Hydrauliques (DGO2), Département des études et de l'appui à la gestion.

Anciennement, ce service faisait partie du Ministère wallon de l'Équipement et des Transport (MET) devenu SPW.

<http://voies-hydrauliques.wallonie.be>

<http://voies-hydrauliques.wallonie.be/opencms/opencms/fr/hydro/crue/>

DGO4: Direction générale opérationnelle - Aménagement du territoire, Logement, Patrimoine et Energie (DGTALPE)

▪ **SWDE** : Société Wallonne des Eaux

Rue de la Concorde, 41 à 4800 VERVIERS

<http://www.swde.be>

▪ **VIVAQUA** (anciennement CIBE: Compagnie Intercommunale Bruxelloise des Eaux)

17 - 19 boulevard de l'Impératrice à 1000 Bruxelles

<http://www.vivaqua.be/>

ANNEXE 2: TABLE DES ILLUSTRATIONS

Liste des figures

Figure I.1: Localisation de la carte Modave-Clavier.....	5
Figure II.1: Territoires paysagers – Modave-Clavier.....	6
Figure II.2: Relief, bassins-versants, rivières – Modave-Clavier	7
Figure II.3: Carte des types de sol – Modave-Clavier	9
Figure II.4: Carte de l'occupation du sol – Modave-Clavier.....	10
Figure III.1: Carte géologique de la Wallonie (Boulvain & Pingot, 2011; modifié).....	11
Figure III.2: Schéma structural du socle de la carte Modave-Clavier	18
Figure IV.1: Principaux aquifères de Wallonie – Carte de Modave-Clavier (SPW-DGO3, 2014; modifié).....	20
Figure IV.2: Entités hydrogéologiques de la carte Modave-Clavier	27
Figure IV.3: Synclinal faillé de Marchin sur la carte Modave-Clavier	29
Figure IV.4: Mise en relation de la variation piézométrique avec l'eau utile mensuelle calculée pour le puits de Jamagne (Modave-Clavier)(Brouyère <i>et al</i> , 2009).....	29
Figure IV.5: Mise en relation de la variation piézométrique avec l'eau utile mensuelle calculée pour le puits de Jamagne et le piézomètre State (Modave-Clavier)	30
Figure IV.6: Synclinal faillé de Vyle-et-Tharoul sur la carte Modave-Clavier	31
Figure IV.7: Fluctuations piézométriques de la nappe des calcaires du Carbonifère - Synclinal de Vyle-et-Tharoul (partie est).....	32
Figure IV.8: Fluctuations piézométriques de la nappe des calcaires du Carbonifère - Synclinal de Vyle-et-Tharoul (partie ouest).....	32
Figure IV.9: Mise en relation de la variation piézométrique avec l'eau utile mensuelle calculée pour Pz1-Vyle - Synclinal de Vyle-et-Tharoul (partie ouest).....	33
Figure IV.10: Entité hydrogéologique de Modave - Carte Modave-Clavier	34
Figure IV.11: Fluctuations piézométriques de la nappe des calcaires du Carbonifère – Entité de Modave (partie est).....	38
Figure IV.12: Comparaison des fluctuations piézométriques de la nappe des calcaires du Carbonifère et de la nappe du Houiller – Entité de Modave (partie est).....	39
Figure IV.13: Fluctuations piézométriques de la nappe des calcaires du Carbonifère – Entité de Modave (partie ouest) – Synclinal de Pailhe	40
Figure IV.14: Mise en relation de la variation piézométrique avec l'eau utile mensuelle calculée pour les piézomètres Pz2, Pz4, Pz7 – Les Avins (Site 'La Vanne')(Brouyère <i>et al</i> , 2009)	41
Figure IV.15: Mise en relation de la variation piézométrique avec l'eau utile mensuelle calculée pour les piézomètres Pz1, Pz2, Pz4 – Petit-Avin (Site 'Pré à la Fontaine')(Brouyère <i>et al</i> , 2009)	41
Figure IV.16: Fluctuations piézométriques de la nappe des calcaires du Carbonifère – Entité de Modave (partie ouest) – Synclinal des Avins.....	42
Figure IV.17: Entité hydrogéologique de Clavier - Carte Modave-Clavier.....	43
Figure IV.18: Mise en relation de la variation piézométrique avec l'eau utile mensuelle calculée pour les piézomètres PT01-02-04-05 Havelange (bassin du Hoyoux) – Entité de Clavier	46
Figure IV.19: Fluctuations piézométriques de la nappe des calcaires du Carbonifère – Entité de Clavier (bassin du Hoyoux: P19-Neb – F12-Clavier)	47
Figure IV.20: Fluctuations piézométriques de la nappe des calcaires du Carbonifère – Entité de Clavier (bassin du Néblon: P10-P16-P17- Neb)	47
Figure IV.21: Fluctuations piézométriques de la nappe des calcaires du Carbonifère – Entité de Clavier (bassin du Néblon: P18-Bonsin)	48

Figure IV.22: Transition Condroz-Famenne - Carte Modave-Clavier.....	49
Figure IV.23: Interactions entre eaux de surface et eaux souterraines - MESO RWM021 sur la carte Modave-Clavier (d'après Brouyère <i>et al.</i> , 2009).....	51
Figure IV.24: Piézométrie calculée (résultats du modèle calibré, à l'échelle régionale, pour l'année 2006, d'après Leroy <i>et al.</i> , 2010).....	52
Figure IV.25: Phénomènes karstiques recensés dans la région Modave-Clavier.....	54
Figure V.1: Masses d'eau souterraine – Modave-Clavier.....	59
Figure V.2: Diagramme de Piper des eaux souterraines de la carte Modave-Clavier.....	61
Figure V.3: Zones vulnérables aux nitrates – Modave-Clavier.....	66
Figure V.4: Evolution des concentrations en nitrates – Synclinal de Marchin - Aquifère des calcaires du Carbonifère.....	67
Figure V.5: Evolution des concentrations en nitrates – Entité de Modave - Aquifère des calcaires du Carbonifère.....	68
Figure V.6: Evolution des concentrations en nitrates – Entité de Clavier - Aquifère des calcaires du Carbonifère.....	69
Figure V.7: Evolution des concentrations en nitrates - Aquifère des grès du Famennien.....	69
Figure V.8: Pesticides en Région wallonne (ICEW, 2012; carte 19 modifiée).....	71
Figure VI.1: Volumes prélevés par VIVAQUA - Aquifère des calcaires du Carbonifère - Modave-Clavier.....	74
Figure VI.2: Volumes prélevés par la CIESAC - Aquifère des calcaires du Carbonifère - Modave-Clavier.....	75
Figure VI.3: Volumes prélevés par l'AIEC - Aquifère des calcaires du Carbonifère & Aquifère des grès du Famennien - Modave-Clavier.....	76
Figure VI.4: Volumes prélevés par la CILE - Aquifère des calcaires du Carbonifère - Modave-Clavier.....	77
Figure VII.1: Localisation des sites avec des tests de pompages et/ou traçages sur la carte Modave-Clavier.....	80
Figure VII.2: Localisation des points d'injection et de restitution - Traçages 2011 - Captages de Modave – VIVAQUA.....	83
Figure VIII.1: Zones de prévention arrêtées autour des puits, P1 & P2, du Bois du Bassin – AIEC.....	88
Figure VIII.2: Zones de prévention arrêtées autour des captages de Haveligeoule (AIEC) et de Château de Bouillon (VIVAQUA).....	89
Figure VIII.3: Zones de prévention arrêtées autour des captages La Vanne & Grand Avin – CIESAC.....	90
Figure VIII.4: Zones de prévention arrêtées autour du captage Petit Avin – CIESAC.....	91
Figure VIII.5: Zones de prévention de la carte Modave-Clavier.....	92
Figure VIII.6: Zones de prévention arrêtées autour du captage St-Pierre à Limet (carte Modave-Clavier) – CILE.....	93
Figure VIII.7: Zones de prévention arrêtées autour des captages du Néblon (carte Modave-Clavier) – CILE.....	94
Figure VIII.8: Zones de prévention arrêtées autour du captage de Jamagne (Marchin) – VIVAQUA.....	95
Figure VIII.9: Zones de prévention arrêtées autour du captage 'Bois de Borlon G1' – SWDE.....	97

Liste des tableaux

Tableau II.1: Répartition de l'occupation du sol – Modave-Clavier	8
Tableau III.1: Comparaison entre l'ancienne carte géologique au 1/40.000 (1902) et la nouvelle nomenclature géologique – Modave-Clavier	16
Tableau IV.1: Tableau de correspondance entre la géologie et l'hydrogéologie – Modave-Clavier.....	26
Tableau V.1: Etat des masses d'eau souterraines de la carte Modave-Clavier	59
Tableau V.2: Caractéristiques hydrochimiques de l'aquifère des calcaires du Carbonifère – Synclinaux de Marchin et de Vyle-et-Tharoul	62
Tableau V.3: Caractéristiques hydrochimiques de l'aquifère des calcaires du Carbonifère – Entité de Modave	63
Tableau V.4: Caractéristiques hydrochimiques de l'aquifère des calcaires du Carbonifère – Entité de Clavier	63
Tableau V.6: Caractéristiques hydrochimiques de l'aquiclude à niveaux aquifères du Houiller	65
Tableau V.5: Caractéristiques hydrochimiques de l'aquifère des grès du Famennien	64
Tableau V.7: Paramètres microbiologiques des eaux souterraines de la carte Modave-Clavier.....	70
Tableau V.8: Principaux pesticides analysés dans les eaux souterraines de la carte Modave-Clavier	72
Tableau VII.1: Valeurs du coefficient de perméabilité en fonction de la granulométrie (Castany, 1998)	78
Tableau VII.2: Intervalles de valeurs indicatives pour la conductivité hydraulique de différentes lithologies (échelles macroscopique & mégascopique) (Dassargues, 2010)	79
Tableau VII.3: Intervalles de valeurs indicatives pour la porosité (n) et la porosité effective de drainage (ne) de différentes lithologies (échelles macroscopique & mégascopique) (Dassargues, 2010).....	79
Tableau VII.4: Caractéristiques des essais de pompage - Valeurs des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère des calcaires du Carbonifère – Forages Synclin'Eau (GEOLYS, 2008).....	81
Tableau VII.5: Caractéristiques des essais de pompage - Valeurs des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère des calcaires du Carbonifère – Site de Limet CILE (LGIH, 2001; 2002).....	81
Tableau VII.6: Valeurs de conductivité hydraulique déduites des essais de pompage/slug tests – Piézomètres du site des galeries de Modave de VIVAQUA (GEOLYS, 2011).....	82
Tableau VII.7: Caractéristiques et paramètres de l'essai de traçage du site des galeries VIVAQUA à Modave (d'après GEOLYS, 2012)	84
Tableau VII.8: Caractéristiques et paramètres des essais de traçage sur le site 'Château de Bouillon' de VIVAQUA et de Haveligeoule de l'AIEC à Havelange (d'après CIBE-AIEC, 2006).....	84

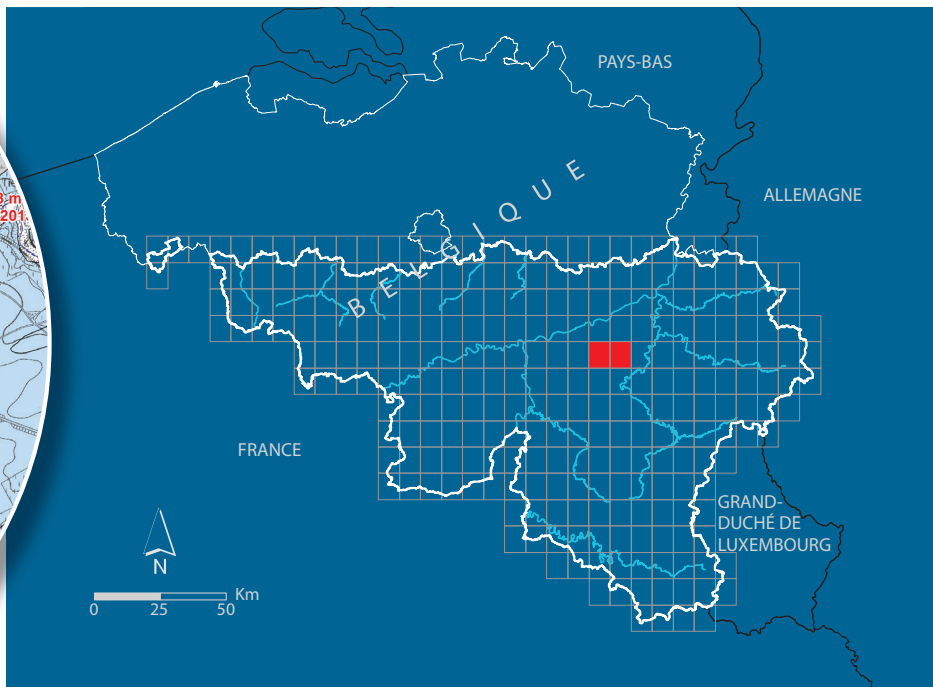
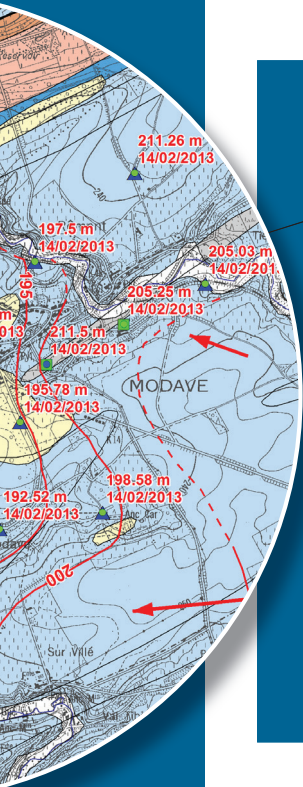
ANNEXE 3: CARTE DE LOCALISATION

ANNEXE 4: COORDONNEES GEOGRAPHIQUES DES OUVRAGES CITES DANS LA NOTICE

Nom	Code RW	Identifiant RW	X(m)	Y(m)	Type	Prof.(m)
Puits Jamagne	-	-	210790,7	127159,4		-
Pz-State	48/7/1/004	58661	212181,6	127888,6	Piézomètre	40
Captage de Marchin (Jamagne) VIVAQUA	48/7/1/001	7488	211571	127562	Source	-
Pz1-Vyle	48/7/2/021	34271	214320	127185	Piézomètre	75
Pz2-Vyle	-	-	214574	127655	Piézomètre	88
St-Pierre Limet CILE	48/7/3/001	6953	215580	127882	Galerie	-
F1-Limet	-	-	215790	127874	Piézomètre	70
F2-Limet	48/7/3/014	32492	215672	127982	Piézomètre	60
F3-Limet	-	-	216119	127932	Piézomètre	72
F5-Limet	-	-	215947	128044	Piézomètre	72
F6-Tinlot	48/8/2/002	34212	221473	128117	Piézomètre	63,22
F7-Ochain	48/8/1/002	39717	220411	125953	Piézomètre	60,67
F8-Tharoul	48/7/1/002	34256	212137	126081	Piézomètre	73,87
F10-Ossogne	48/7/4/002	34255	210102	122404	Piézomètre	68,43
F11-Havelange	48/7/8/005	34257	213348	120168	Piézomètre	48,07
F12-Clavier	48/8/4/017	39692	218444	122476	Piézomètre	52,49
Galerie Principale (RV15) Modave VIVAQUA	48/7/2/002	5256	215000	126661	Galerie	-
Roche au Corbeau Modave VIVAQUA	48/7/2/010	2792	215077	126710	Galerie	-
Rouge Porte Modave VIVAQUA	48/7/3/003	2934	215869	125211	Galerie	-
Pz1-Modave	48/7/3/015	44234	215798	126102	Piézomètre	69
Pz2-Modave	48/7/3/016	44235	216267	126546	Piézomètre	35
Pz3-Modave	48/7/3/017	44236	216786	127007	Piézomètre	53,5
Pz4-Modave	48/7/3/018	44237	217153	126430	Piézomètre	31,4
Pz5-Modave	48/7/3/019	44238	216619	125240	Piézomètre	46
Pz6-Modave	48/7/3/020	44239	216085	125152	Piézomètre	34
Pz7-Modave	48/7/5/007	44240	214983	124524	Piézomètre	76
Pz8-Modave	48/7/2/024	44241	214902	126405	Piézomètre	62,5
Pz9-Modave	48/7/2/025	44242	214096	125754	Piézomètre	41,5
Pz10-Modave	48/7/2/026	44243	214611	125547	Piézomètre	61,4
Pz11-Modave	48/7/5/008	44244	214305	124531	Piézomètre	30,5
Pz12-Modave	48/7/3/021	44245	216191	125710	Piézomètre	55

<u>Nom</u>	<u>Code RW</u>	<u>Identifiant RW</u>	<u>X(m)</u>	<u>Y(m)</u>	<u>Type</u>	<u>Prof.(m)</u>
F6P4 - PT04 Pailhe			213270	124240	Piézomètre	49,5
PP1-Clavier	48/7/6/011	34275	217695	124220	Puits	
PP2-Modave			216730	126220	Puits	
PP3-Modave			216330	126010	Puits	
PP4-Pailhe	48/7/5/006	34258	213590	124030	Puits	
PP5-Linchet	48/8/1/001	12015	218366	126791	Puits	
PP15-Ossogne	48/7/7/004	17993	210180	122730	Puits	
P1-Bois de Bassin AIEC	48/7/5/002	314	213293	121688	Puits	75,1
P2-Bois de Bassin AIEC	48/7/5/004	21370	213340	121730	Puits	101
Château de Bouillon VIVAQUA	48/7/002	3842	214308	119427	Galerie	1,8
PT01-HAVELANGE			213716	118851	Piézomètre	40
PT02-HAVELANGE			214181,5	119161,3	Piézomètre	25
PT04-HAVELANGE			214392,9	119268,8	Piézomètre	15
PT05-HAVELANGE			214576,4	118799,1	Piézomètre	44
PT06 - HAVELANGE PYRAMIDE	48/7/8/004	34272	214522	118893,6	Piézomètre	33
Haveligeoule AIEC	48/7/8/001	1702	215000	120430	Source	
PT07-HAVELANGE			214889,8	120410	Piézomètre	10
PT08-HAVELANGE			214906	120081	Piézomètre	25
La Vanne – Avin CIESAC	48/7/6/001	2080	216332	123603	Galerie	
PZ1 - Les Avins			216338,4	123637	Piézomètre	12,5
PZ2 - Les Avins			216422	123586,1	Piézomètre	38,5
PZ3 - Les Avins			216187,6	123446,9	Piézomètre	15
PZ4 - Les Avins			216784,2	123721,4	Piézomètre	47,7
PZ5 - Les Avins			216142,9	123219,5	Piézomètre	14,5
PZ6 - Les Avins			215961,1	123146,4	Piézomètre	15,5
PZ7 - Les Avins			216100,8	123106,8	Piézomètre	12,5
PZ8 - Les Avins			216182,9	122931,4	Piézomètre	36
Petit-Avin (Pré à la Fontaine) CIESAC	48/7/5/001	6493	215172	121948	Source	
PZ1 - Petit Avin			214923	121700,9	Piézomètre	
PZ2 - Petit Avin			215068,2	121928	Piézomètre	
PZ4 - Petit Avins			215372,4	121983,4	Piézomètre	
F1 Bois et Borsu			220155	121715	Piézomètre	54
F2 Bois et Borsu			219915	121510	Piézomètre	56

<u>Nom</u>	<u>Code RW</u>	<u>Identifiant RW</u>	<u>X(m)</u>	<u>Y(m)</u>	<u>Type</u>	<u>Prof.(m)</u>
Fond Saint Martin CIESAC	48/8/8/002	7009	221724	120792	Source	
F6-Avin			214482	121242	Piézomètre	21,5
F7-Avin			214794	121529	Piézomètre	18
P10-Neb	48/8/3/003	6096	225631	125916	Piézomètre	75
P16-Neb	48/8/6/003	1249	225118	123053	Piézomètre	
P17-Neb	48/8/5/001	1328	222225	122825	Piézomètre	91,25
P19-Neb	48/7/9/001	5652	217675	121025	Piézomètre	
P18-Bonsin	48/8/8/003	828	222019	119180	Piézomètre	
Bor4 - FERME DES MOINES	48/8/9/005	765	225299	120627	Puits	60
Briffoz P2	48/7/5/006	48816	212869	124269	Puits	78
Limonaderie			214915	127058	Source	
Du préau	48/8/4/006	11685	214670	122775	Puits	
Puits Maréchal	48/8/6/006	20148	224345	123534	Puits	110
Puits Ocquier			222740	121670	Puits	
Perte du Bois de Marsée			224340	122920	Perte	
Perte d'Oneu			225256	120559	Perte	
Perte de Vyle			214395	126945	Perte	
Perte diffuse de Bende			224525	123700	Perte	
Galerie Principale du Néblon CILE		49/5/4/009	227223	123395	Galerie	



SPW | Éditions, CARTES

Dépôt légal : D/2016/12.796/4 – ISBN : 978-2-8056-0218-4

Editeur responsable : Brieuc QUEVY , DGO 3,
15, Avenue Prince de Liège – 5100 Jambes (Namur) Belgique

N° Vert du SPW : 1718 (Appel gratuit) - www.wallonie.be